



Conduite complètement automatisée : acceptabilité, confiance et apprentissage de la reprise de contrôle manuel

William Payre

► To cite this version:

William Payre. Conduite complètement automatisée : acceptabilité, confiance et apprentissage de la reprise de contrôle manuel. Psychologie. Université Paris 8, 2015. Français. NNT : . tel-01239973

HAL Id: tel-01239973

<https://theses.hal.science/tel-01239973>

Submitted on 8 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Paris 8
Ecole Doctorale Cognition, langage, interaction

Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

Laboratoire de Psychologie des Comportements et des mobilités
Département Aménagement Mobilité Environnement

Institut du Véhicule Décarboné et Communicant et de sa Mobilité

Thèse de doctorat
pour l'obtention du grade de
Docteur en psychologie

William PAYRE

Conduite complètement automatisée : acceptabilité, confiance et apprentissage de la reprise de contrôle manuel

Fully automated driving: acceptability, trust and learning of manual control recovery

Thèse présentée et soutenue à Paris 8 le 03 décembre 2015 devant le jury composé de :

Christian BASTIEN	Professeur, Université de Lorraine, France	Rapporteur
Julien CESTAC	Chercheur, Ifsttar, France	Co-directeur de thèse
Patricia DELHOMME	Directeur de recherche HDR, Ifsttar, France	Directrice de thèse
Victor ETGENS	Professeur, Directeur Scientifique de Vedecom, France	Examineur
Anabela SIMOES	Professeure, Institut Supérieur de Gestion, Portugal	Présidente
Alain SOMAT	Professeur, Université de Rennes 2, France	Rapporteur
Charles TIJUS	Professeur, Université de Paris 8, France	Examineur

Cette thèse a été préparée au Laboratoire de Psychologie des Comportements et des mobilités (LPC) de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)

25 Allée des Marronniers

F-78000 Versailles-Satory

Avec le soutien d'un contrat de recherche de l'Institut du Véhicule Décarboné et Communicant et de sa Mobilité (VEDECOM)

77, rue des Chantiers

78000 Versailles

Remerciements

Je tiens à remercier Patricia Delhomme et Julien Cestac pour leur investissement dans la direction de cette thèse. Leur disponibilité et patience ont été essentielles au bon déroulement de ces trois années.

Je souhaiterais également remercier l'ensemble des encadrants et partenaires de l'institut VEDECOM pour leurs précieux conseils, la confiance qu'ils m'ont accordée, et le financement de la thèse ainsi que des études réalisées : Jean-Laurent Franchineau, Jean-François Forzy, Lucianno Ojeda, Patricia Jonville, Ebru Dogan...

Je souligne également la bienveillance, la gentillesse et le soutien de l'ensemble des membres des laboratoires LPC, LIVIC et LEPSIS de l'IFSTTAR, présents et partis, qui ont grandement facilité mon travail et le quotidien au laboratoire. Une pensée particulière pour Thong et Fabrice dont l'abnégation pour simuler une conduite complètement automatisée a été sans faille, et pour Anissa, Alain et Eva dont l'aide a été précieuse lors des études sur simulateur, que ce soit pour la passation ou le traitement des données.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien, leurs encouragements et leur curiosité.

Résumé

Des voitures complètement automatisées pourraient circuler sur les routes dans les décennies à venir. Elles permettraient aux automobilistes d'être conduits dans leur véhicule par un système informatique. Une telle innovation pourrait engendrer une révolution qui affecterait le rôle du conducteur et ses activités pendant le trajet, mais aussi l'infrastructure, le transport de marchandises, certaines professions, etc. Actuellement, ces véhicules ne sont pas encore accessibles au grand public, et il demeure difficile de prédire précisément quand cela se produira, et quelles seront leurs caractéristiques techniques finales. Dans ce contexte, un des objectifs de cette thèse a été d'étudier dans quelle mesure la conduite complètement automatisée sera acceptée. Bien que l'automobiliste soit conduit par son véhicule, il pourrait être amené à en reprendre le contrôle manuel dans différentes circonstances. En effet, cette manœuvre pourrait être effectuée en situation d'urgence ou de manière anticipée par le conducteur alors qu'il pourrait être engagé dans une autre activité que la conduite. La réalisation de cette reprise de contrôle manuel pourrait être plus ou moins difficile selon la situation et l'expérience d'interactions avec le système complètement automatisé. Nous avons examiné la manière dont cette manœuvre pourrait être apprise par des conducteurs, en testant l'effet de différentes formes d'entraînement sur la performance et la sécurité (temps de réponse et qualité de la reprise de contrôle). Nous avons mesuré l'acceptabilité et la confiance, les attitudes des conducteurs, les intentions d'utilisation du système de conduite complètement automatisée et l'impact de ces variables sur les comportements dans le véhicule.

Trois études empiriques ont été réalisées. La première, adossée à deux études pilotes, est une étude en ligne ($N= 421$, 36% d'hommes) évaluant les attitudes envers la conduite

complètement automatisée, l'acceptabilité *a priori* et les intentions d'utilisation. Cette conduite pourrait nécessiter de nouvelles compétences concernant la reprise de contrôle manuel. Ainsi, la question de l'apprentissage a été au cœur de la problématique de la deuxième étude. Celle-ci ($N= 69$, 54% d'hommes) a été réalisée dans un simulateur de conduite sur autoroute. Les attitudes ont été mesurées avant et après interaction avec cette technologie. Les comportements des conducteurs pendant l'interaction avec le système de conduite complètement automatisée ont également été examinés. Les effets de deux types de pratique (simple vs. élaborée) de la conduite complètement automatisée sur la reprise de contrôle manuel (temps de réponse) ont été analysés. Plusieurs situations de reprises de contrôle ont été testées : certaines étaient urgentes et inattendues, d'autres étaient anticipées. Nous avons observé que l'effet de la surconfiance, qui augmente les temps de réponse en situation d'urgence, pouvait être modéré par une pratique élaborée. Les objectifs de la troisième étude étaient d'approfondir les connaissances sur la manière d'apprendre à utiliser la conduite complètement automatisée, notamment pour reprendre le contrôle manuel, et d'examiner l'impact de la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite sur cette manœuvre en situation d'urgence. Les participants ($N= 113$, 49% d'hommes) ont été répartis selon deux conditions d'entraînement (simple vs. élaboré), et selon qu'il y ait eu ou non réalisation de tâches non reliées à la conduite pendant le trajet. La condition entraînement simple consistait en une pratique succincte de la conduite complètement automatisée. La condition entraînement élaboré comprenait une partie théorique, une vidéo de démonstration, ainsi qu'une pratique comprenant davantage d'interactions avec le système de conduite complètement automatisée. Après avoir parcouru un trajet pendant une vingtaine de minutes, la confiance, l'acceptabilité, les attitudes et les intentions d'utilisation ont été mesurées. L'entraînement élaboré a amélioré la performance de reprise de contrôle manuel en situation d'urgence (temps de réponse plus courts et plus grande précision de l'utilisation des pédales).

La réalisation d'une tâche non reliée à la conduite a allongé les temps de réponse, mais n'a pas eu d'effet sur la précision de l'utilisation des pédales. Enfin, l'entraînement élaboré a contribué à atténuer le phénomène de surconfiance dans le système.

Les résultats de ces trois études sont discutés. Les méthodes d'entraînement que nous avons développées pourraient servir à former les nouveaux utilisateurs de cette technologie. Le rôle du conducteur dans ce type de véhicule et la nature de la tâche de conduite sont questionnés. Le degré de supervision exercé sur le système deviendrait secondaire par rapport à la réalisation d'une autre tâche non reliée à la conduite. Enfin, les limites de nos études et les perspectives pour les recherches à venir dans le domaine sont examinées.

Mots-clefs : conduite complètement automatisée, reprise de contrôle manuel, apprentissage, acceptabilité, confiance, psychologie expérimentale, interface homme-machine, simulateur, enquêtes.

Abstract

Fully automated cars could possibly be on the road in the decades to come. They will allow drivers to be driven by an informatics system in their own vehicle. Such an innovation could lead to a revolution that would change the driver's status and its activities during the trips, but also the infrastructure, freight, some professions, etc. Nowadays, these vehicles are not available for sale yet, and it is difficult to forecast accurately when they will be, and also what their features will be. Considering this, one of the aims of the present thesis is to examine to what extent fully automated driving will be accepted. Even though the driver is driven by its vehicle, he could have to resume manual control in different circumstances. Indeed, this maneuver could be performed in an emergency or in an anticipated situation while he could be engaged in a non-driving related activity. Performing a manual control recovery could be more or less difficult according to the situation and the experience with the fully automated system. The way this maneuver could be learned by drivers has been examined, testing the impact of different kinds of training on performance and safety (response time and control recovery quality). Acceptability, trust, drivers' attitudes, intentions to use the fully automated driving system and the impact of these variables on behaviors inside the vehicle have been assessed.

Three empirical studies have been realized. The first one, based on two pilot studies, is an online survey ($N= 421$, 36% of males) assessing attitudes toward fully automated driving, *a priori* acceptability and intentions of use. This specific driving could require new skills to perform manual control recovery. Hence, learning has become an important point of the second study problematic. This second study ($N= 69$, 54% of males) has been conducted in a driving simulator on a highway. Attitudes have been measured before and after interacting

with this technology. Drivers' behaviors during the interaction with the fully automated driving system have also been examined. The effect of two kinds of practice (simple vs. elaborated) of fully automated driving on manual control recovery (response times) have been analyzed. Several manual control recovery situations have been tested: some of them were unexpected and urgent, some of them were anticipated. Results showed that the effect of overtrust, increasing response time in the emergency situation, could be moderated for drivers who followed the elaborated practice condition. The aims of the third study are to increase the knowledge on the way to learn how to use fully automated driving, most notably manual control recovery, and to examine the impact of a non-driving related task performing on that maneuver in an emergency situation. Participants ($N= 113$, 49% of males) have been distributed among two training conditions (simple vs. elaborate), and among two non-driving related task performing conditions (with vs. without). The simple training condition involves a short practice of fully automated driving. The elaborate training condition involves the explanation of the underlying features of the system with a text, a demonstration video, and a practice with more interactions than the simple training condition. After a 20 minutes run, trust, acceptability, attitudes and intentions to use the system have been measured. Elaborated training improved emergency manual control recovery in case of emergency (shorter response times, and greater pedal-use accuracy). Performing a non-driving related task increased response times, but did not significantly impact pedal-use accuracy. Eventually, elaborated training contributed to moderate overtrust in the system.

Results of these three studies are discussed. The training methods that have been developed could help training the new users of that technology. Driver status in this kind of vehicle, as well as the nature of the driving task, are debated. Finally, the limits of the studies and perspectives for future research in the field are examined.

Keywords: fully automated driving, manual control recovery, learning, acceptability, trust, experimental psychology, human-machine interface, simulator, surveys.

Sommaire

Résumé	5
Abstract	8
Sommaire	11
Index des tableaux	14
Index des figures	16
Index des acronymes	17
Chapitre I : Introduction	21
Chapitre II : Automatisation et conduite automobile	43
1. L'automatisation.....	44
1.1. Définition	44
1.2. Les niveaux d'automatisation	44
1.3. Les interactions homme-machine dans un système automatisé.....	50
2. Activité de conduite manuelle et automatisée	55
2.1. Modèles cognitifs de la conduite manuelle.....	55
2.2. Les aides à la conduite	57
2.3. Bénéfices et limites de la conduite automatisée	59
2.4. Nomenclatures : NHTSA & SAE	65
3. Evolution de la conduite automatisée : premiers concepts et défis majeurs	67
3.1. Genèse de l'automatisation des véhicules.....	67
3.2. Premiers modèles issus de la recherche	68
3.3. Les défis des années 2000	70
3.4. L'automatisation des véhicules commercialisés	72
3.5. L'automatisation de véhicules pour le transport public	76
3.6. La <i>Google self-driving car</i>	79
3.7. Conclusions.....	80
4. Législation et infrastructure de la conduite automatisée	81
4.1. De l'importance du vide juridique autour de la conduite complètement automatisée	81
4.2. L'environnement routier et l'infrastructure dans le sillage de l'automatisation....	84
5. Conclusions	85
Chapitre III : Facteurs humains et automatisation	89
1. Introduction	89
1.1. Le contrôle	90
1.2. La charge de travail.....	95
1.3. Facteurs de personnalité.....	99
1.4. Adaptation comportementale	101

1.5. Influence de l'âge, de l'expérience et des conditions de trafic sur la reprise de contrôle manuel.....	102
2. Acceptabilité d'un système	104
3. Confiance : modèles et impacts sur la conduite automatisée	109
4. Apprentissage et pratique de la conduite complètement automatisée.....	114
4.1. Introduction.....	114
4.2. Expérience et aide à la conduite.....	116
4.3. Comment apprendre à conduire une voiture complètement automatisée ?	118
4.4. Méthode d'apprentissage à la conduite complètement automatisée	122
5. Compétences connaissances de conduite automatisée	125
5.1. Nouvelles compétences et connaissances sollicitées par la conduite complètement automatisée	125
5.2. Perte des compétences et conduite automatisée.....	130
6. Les tâches non reliées à la conduite	133
Chapitre IV : Problématique	137
Chapitre V : Etudes empiriques	149
1. Etude 1 : Intention d'utiliser une voiture complètement automatisée : attitudes et acceptabilité <i>a priori</i>	149
1.1. Introduction.....	149
1.2. Objectifs.....	150
1.3. Etudes pilotes	150
1.4. Etude principale	156
1.5. Résumé des principaux résultats de l'étude 1	164
1.6. Discussion	164
1.7. Limites de l'étude	170
1.8. Perspectives.....	170
2. Etude 2 : Impact de la pratique et de la confiance sur la reprise de contrôle manuel d'une voiture complètement automatisée sur simulateur	172
2.1. Introduction.....	172
2.2. Méthode	173
2.3. Mesures	184
2.4. Hypothèses opérationnelles	186
2.5. Résultats.....	187
2.6. Résumé des principaux résultats de l'étude 2	192
2.7. Discussion	192
2.8. Perspectives.....	197
3. Etude 3 : Impact de l'entraînement et de la réalisation d'une tâche sur la reprise de contrôle manuel dans une voiture complètement automatisée sur simulateur	198

3.1. Introduction.....	198
3.2. Questions de recherche	200
3.3. Hypothèses	201
3.4. Méthode	201
3.5. Mesures	215
3.6. Hypothèses opérationnelles	218
3.7. Résultats.....	219
3.8. Résumé des principaux résultats de l'étude 3	229
3.9. Discussion	230
3.10. Perspectives.....	236
Chapitre VI : Discussion générale et conclusion	240
Bibliographie.....	256
Annexes.....	278
1. Etude 1.....	278
1.1. Questionnaire première étude pilote :	278
1.2. Questionnaire final en ligne	280
2. Etude 2.....	285
2.1. Exemple d'entretien post-expérience.....	285
2.2. Diamètre pupillaire, mesure de l'anxiété : exemple pour un participant	291
3. Etude 3.....	292
3.1. Tâches d'anagrammes et de labyrinthe.....	292
3.1. Exemple de la grille d'analyse pour la tâche de listage d'idées	294
3.2. Exemple de données oculométriques	295
3.3. Exemple de données de réponse électrodermale	295
4. Article de l'étude 1	297
5. Article de l'étude 2	332

Index des tableaux

Tableau 1 : Hiérarchisation des niveaux d'automatisation de la prise de décision, d'après Sheridan (1992).....	45
Tableau 2 : Taxonomie des niveaux d'automatisation, d'après Endsley <i>et al.</i> , (1997).	46
Tableau 3 : Grille de lecture des croisements des niveaux et modes de coopérations, d'après Hoc, Young & Blosseville (2009).....	53
Tableau 4 : Taxonomie des tâches de conduite, d'après Stanton <i>et al.</i> (2001).	57
Tableau 5 : Les différents types d'aides à la conduite	58
Tableau 6 : Nomenclature BAST et SAE de la conduite automatisée	66
Tableau 7 : Principaux projets de véhicules automatisés pour le grand public.....	73
Tableau 8: Les projets CityMobil.....	77
Tableau 9 : Extrait de l'article 8, chapitre II de la Convention de Vienne.....	81
Tableau 10 : Matrice GDE, Assailly (2007)	126
Tableau 11 : Moyennes, dispersion et corrélations entre les variables du questionnaire ($N = 421$).....	161
Tableau 12 : Moyennes et effets du genre.....	162
Tableau 13 : Régression linéaire hiérarchique de l'intention d'utiliser une voiture complètement automatisée	163
Tableau 14 : Description des deux différentes pratiques et du scénario commun	177
Tableau 15 : Temps de réponse moyens pour les trois reprises de contrôle (en secondes). Echantillon total.	188
Tableau 16 : Impact de la confiance et de la pratique sur les reprises de contrôle manuel ...	190
Tableau 17 : Régression linéaire hiérarchique de l'impact de la pratique et de la confiance (centrée) sur le temps de réponse lors d'une reprise de contrôle urgente ($N = 60$).....	190

Tableau 18 : Répartition de l'effectif ($N = 113$)	203
Tableau 19 : Description des deux différents entraînements et du trajet commun réalisé sur simulateur.....	208
Tableau 20 : Temps de réponse (en s) pour les reprises de contrôle manuel en cas de panne du système, en fonction de l'entraînement ($N = 109$)	220
Tableau 21 : Nombre d'interactions pieds-pédales.....	221
Tableau 22 : Temps de réponse (en s) en fonction de la simultanéité des pieds et des mains lors de la reprise de contrôle manuel.....	222
Tableau 23 : Temps de réponse (secondes) en fonction de la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite	223
Tableau 24 : Fréquences de la manière dont les participants ont repris le contrôle manuel ..	224
Tableau 25 : Temps de réponse (en s) pour les reprises de contrôle manuel lors de la première panne, en fonction de l'entraînement et de la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite	225
Tableau 26 : Temps de réponse (en s) pour les reprises de contrôle manuel lors de la seconde panne, en fonction de l'entraînement et de la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite	226

Index des figures

Figures 1 a&b : Extraits de journaux américains des années 50	21
Figure 2 : Extrait du carnet d'ingénieur de Francesco di Giorgio Martini, 1470.	67
Figure 3: Habitacle du premier véhicule automatisé capable de conduire à basse vitesse sans intervention humaine, Laboratoire d'Ingénierie Mécanique, Tsukuba, Japon.....	68
Figure 4 : La cybercar CityMobil utilisée à la Rochelle	78
Figure 5 : Descriptions des dispositifs de conduite sur la <i>Google self-driving car</i>	80
Figure 6 : Boucle de contrôle de la conduite manuelle de véhicule.....	91
Figure 7 : Absence de contrôle manuel de la conduite automatisée de véhicule	92
Figure 8 : Taxonomie de l'acceptabilité d'un système, d'après Nielsen (1994).....	104
Figure 9 : Modélisation des interactions entre les compétences et les caractéristiques individuelles des automobilistes dans une voiture automatisée	142
Figure 10 : Echelle d'acceptabilité <i>a priori</i> de la conduite complètement automatisée.....	160
Figure 11 : Le simulateur de conduite de l'IFSTTAR, à Satory.....	173
Figure 12 : Vue du dessus du simulateur de l'IFSTTAR	174
Figure 13 : Interaction entre la pratique et la confiance sur le temps de réponse (en s)	191
Figure 14 : Vue de l'habitacle du véhicule du simulateur, pendant la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite.....	202
Figure 15 : Prise de vue dans l'habitacle du véhicule pour mesurer la précision de l'utilisation des pédales.....	217
Figure 16 : Tâche d'anagrammes, étude 3	292
Figure 17 : Tâche du labyrinthe, étude 3.....	293

Index des acronymes

ABS : Anti-lock Braking System

ACC : Adaptive Cruise Control

ADAS : Advanced Driving Assistance System

AS : Auto-Steering

CCA : Conduite Complètement Automatisée

DSM : Driver System Monitoring

FAA : Federal Aviation Administration

GDE : Goals for Driver Education

GPS : Global Positionning System

ICC : Intelligent Cruise Control

ISA : Intelligent Speed Adaptation

LIDAR : Light Detection And Ranging

NHTSA : National Highway Traffic Safety Administration

RCM : Reprise de Contrôle Manuel

SID : aide à l'inter-distance entre véhicules

TAM : Technology Acceptance Model

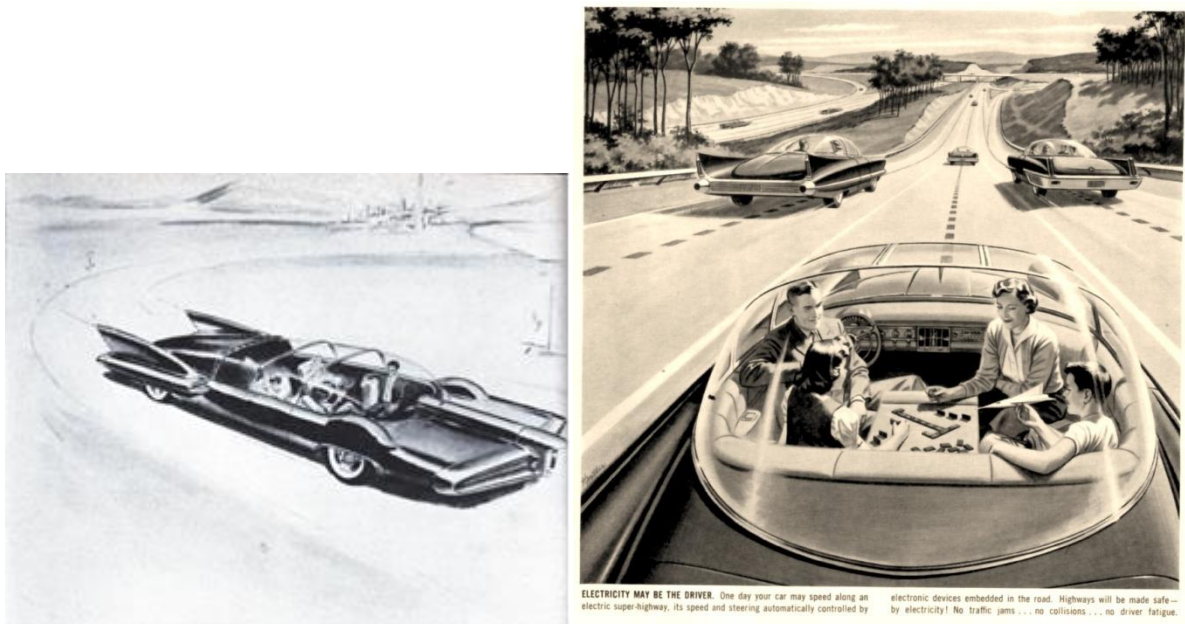
Chapitre I :

Introduction

Chapitre I : Introduction

La voiture complètement automatisée circulant sur route fait partie des représentations partagées sur l'innovation de la conduite automobile. C'est une vitrine technologique pour les constructeurs tout comme une image de marque pour les entreprises (Figures 1 a&b). La recherche aussi bien privée que publique s'y intéresse à l'échelle internationale. Ce type de développement s'intègre dans un environnement plus large (internet des objets, intelligence ambiante, etc.) qui concerne les transports mais aussi l'habitat, le commerce, la santé.

Figures 1 a&b : Extraits de journaux américains des années 50



Note : A gauche (a) : Illustration extraite du mensuel *Wisdom* de novembre 1956 : *Not next year's mode but surprisingly close to it is this Highway Cruiser. It will be driven manually onto a limited-access super-highway, but after making contact with a magnetic strip along the preferred speed lane, it will be guided by electronic steering and safety devices.* A droite (b) : Publicité de la Carolina Power & Light Company, parue dans le quotidien *Wilmington News* du 18 janvier 1956 : *One day your car may speed along an electric super highway, its speed and steering automatically controlled by electronic devices embedded in the road. Highways will be made safe by electricity! No traffic jams... no collisions... no driver fatigue*

C'est aussi un objet dont la science-fiction s'est inspirée durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Le contexte de mobilité dans lequel la voiture complètement automatisée est apparue, notamment dans la bande-dessinée *Les mange-bitume* (Lob & Bielsa, 1974), est encore d'actualité en 2015. Alors que les routes dans et autour des grandes villes sont saturées, l'*homo-mobilis* passe de plus en plus de temps dans sa voiture et en fait même son lieu de vie, comme le décrit Goscinnny dans la préface du premier tome de cette revue : *L'homo-mobilis (...) se défoule au Rond-Point de la Défonce, gigantesque fête foraine, soupape de sûreté pour gens ayant perdu l'habitude de marcher. Le Mange-Bitume connaît l'angoisse de l'air libre, et ne supporte plus, sa vie durant, que le confort douillet de son car familial, condamné à rouler interminablement*. L'une des histoires de cette bande-dessinée est centrée sur la voiture complètement automatisée et raconte comment Stan Coach, un journaliste, découvre l'existence de voitures sans conducteur, pilotées par un ordinateur. Ces véhicules se multiplient au détriment de ceux conduits par les êtres humains, et finissent par occuper la totalité du parc automobile. De nombreuses références à la voiture complètement automatisée ont été faites par la pop-culture, dans des contextes plus légers que *Les mange-bitume*, comme la série *K2000* (Ewing, 1982) qui met en scène les tribulations d'un justicier au volant d'une voiture dotée d'une intelligence artificielle et capable, entre autres choses, de rouler de manière autonome dans toutes sortes d'environnements. Citons également la série *The Simpsons* (Groening, 1989) dont l'épisode *Maximum overdrive* (1999) raconte comment Homer, le protagoniste, découvre par inadvertance le système *Navitron Autodrive* d'un camion de transport qui permet au chauffeur de déléguer totalement la conduite. Cette liste n'est pas exhaustive, et bon nombre de fictions ont utilisé un véhicule complètement automatisé dans leur récit (par exemple Batman, Minority Report, La Coccinelle, Boumbo, etc.).

Dans la réalité, des prototypes existent, mais ils circulent sous certaines conditions et avec certaines limites : contraintes techniques (la route doit être en bon état, le système ne reconnaît pas de manière fiable quand un agent de la circulation intervient sur la route et le considère comme un piéton), circulation en zones dédiées, autorisation des autorités nécessaires pour les faire circuler sur routes et présence d'un ingénieur à bord obligatoire. C'est le cas de la *Google self-driving car* aux Etats-Unis et des véhicules électriques autonomes des projets CityMobil 1 & 2 (*pod cars*) à La Rochelle. Selon les constructeurs et industriels, les prévisions de la mise en circulation sur les voies publiques de cette technologie divergent. Il est ici question d'une conduite sans l'intervention d'un automobiliste. Pour le PDG de Ford, les voitures complètement autonomes (*driverless cars*) seront disponibles sur le marché à l'horizon 2020 (Driverless car market watch, 2015). La prochaine génération d'Audi A8 devrait être en mesure de conduire de manière complètement autonome en 2017. C'est une année de moins que l'estimation donnée par l'un des fondateurs de Google pour leur prototype. Il faudra attendre 2020-2021 pour que le grand public puisse utiliser une voiture complètement autonome, et attendre deux à trois années supplémentaires pour que la juridiction soit à jour sur la question, d'après le PDG de Tesla. Jaguar et Land Rover estiment que ce véhicule sera disponible en 2024, une année de moins que la prévision formulée par Daimler. Récemment, Apple a laissé connaître son intérêt pour la conduite automatisée qui représente un marché porteur en termes de communication via le projet Titan, en demandant la location d'un complexe militaire haute-sécurité dans la baie de San Francisco (The Guardian, 2015). Enfin, l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) a prévu que 75% des véhicules seraient autonomes à l'horizon 2040. Des automobilistes de 109 pays différents estiment quant à eux que cette technologie atteindra 50% de part du marché d'ici à 2050 (Kyriakidis, Happee, & de Winter, 2014). Ainsi, d'ici 2020 au plus tôt, les premières voitures complètement autonomes accessibles à tous circuleront sur routes. En 2015, les

prototypes sont donc à un stade de développement avancé, mais celui de la commercialisation n'est pas pour tout de suite. Par exemple, depuis juin 2015, la *Google self-driving car* roule à Mountain View en Californie mais les conducteurs sont des experts du domaine. La conduite complètement automatisée risque d'entraîner des nouveautés dans la manière d'utiliser son véhicule. Elle va provoquer des changements majeurs dans les transports et les modes vie. Les automobilistes ne vont plus conduire mais seront conduits.

Le véhicule de demain

Pourquoi la voiture autonome est-elle au centre de toutes les attentions ? Le défi technologique à relever pour construire un véhicule fiable peut être un premier élément de réponse. Les défis Defense Advanced Research Project Agency (DARPA), initialement à vocation militaire, en sont un exemple éloquent. Apporter de la nouveauté à une industrie qui a pâti depuis mi-2008 de la hausse vertigineuse du prix du baril de pétrole, et qui doucement se redynamise aux États-Unis, en Europe et au Japon (Haugh, Mourougane, & Chatal, 2010) est un autre élément de réponse. Le gain de temps pour vaquer à des occupations telles que dormir pendant un trajet est un argument commercial mis en avant (Kaufman, 2014). La possibilité de réaliser des activités pendant que l'on est conduit (consulter ses emails, manger, regarder un film, s'occuper d'autres passagers, etc.) permet de mieux optimiser son temps ce qui est un avantage indéniable. Il est également avancé par la Commission Européenne que la conduite autonome vise à accroître la sécurité routière, réduire la congestion du trafic, les émissions de gaz et la consommation d'essence (European Commission, 2011). Ces données ne sont pas encore toutes chiffrées car il est difficile de les estimer, toutefois certaines d'entre elles sont disponibles. Ainsi, l'utilisation de nouvelles technologies de transport comme le régulateur de vitesse adaptatif (Adaptive Cruise Control [ACC], qui gère en partie l'accélération et le freinage du véhicule), l'éco-navigation et la communication entre véhicules (capable de diffuser des informations sur le trafic en temps réel et de permettre ainsi

aux systèmes GPS d'éviter les zones congestionnées) pourrait diminuer de 2 à 4% la consommation de carburant (2 647 milliards de barils de pétrole) et la production de gaz à effet de serre (279 millions de tonnes métriques de CO₂) chaque année pour les dix prochaines années aux Etats-Unis (Intelligent Transportation Society of America, 2014). Des études sur simulateur ont montré que la sécurité de la conduite peut être accrue lorsque le degré d'automatisation est élevé. En effet, les distances de sécurité inter-véhicules sont davantage respectées comparées à la conduite manuelle (Jamson, Merat, Carsten, & Lai, 2013). Des résultats similaires ont été trouvés concernant l'utilisation de l'ACC uniquement, à ceux comparés à la conduite manuelle (Stanton & Young, 2005 ; Young & Stanton, 2004).

Lorsque le pilotage automatique est activé, l'automobiliste est *remplacé* par un système informatique pour améliorer certaines dimensions de la conduite comme la sécurité, la fluidité du trafic, l'écologie et l'économie. Grâce à la technologie, le véhicule conduit de manière autonome. Cependant, qu'entend-on par *autonome* ? Un véhicule autonome peut-il conduire sans l'intervention de l'automobiliste, ne serait-ce que pour enclencher le système ou reprendre l'autorité sur la conduite ? Pourtant, et jusqu'à preuve du contraire, c'est l'automobiliste qui décidera d'utiliser ou non ce système. La notion d'autonomie pourrait tout aussi bien renvoyer à la capacité de ces véhicules à rouler sans l'aide d'autres véhicules, ce qui est contradictoire avec le fait que la communication entre véhicules autonomes est une stratégie utilisée pour renforcer la robustesse du système de pilotage automatique. Par conséquent, le terme employé dans cette thèse sera la conduite automatisée.

La conduite automatisée peut être définie comme étant la prise en charge partielle ou totale de la conduite d'un véhicule terrestre à moteur par un système informatique, en présence d'un automobiliste derrière le volant. Le niveau étudié dans cette thèse est l'automatisation complète du véhicule : le contrôle latéral, longitudinal, les manœuvres et les interactions avec l'environnement sont pris en charge par le système de pilotage automatique.

Ce niveau d'automatisation correspond au niveau 4 (automatisation complète de la conduite) de la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA, 2013) et au niveau 5 (automatisation complète) de la Society of Automotive Engineer (SAE, 2014) si on se réfère à ces catégories. La conduite complètement automatisée pourrait se faire sur des trajets complets, mais peut-être aussi seulement sur des tronçons de route. Effectivement, il est envisagé, au moins dans un premier temps, que des zones soient dédiées à la conduite automatisée et que ce mode ne soit pas utilisable n'importe où, notamment en ville où les situations de conduite peuvent être complexes (Parent, 2012).

En attendant que ces véhicules soient accessibles au grand public, il reste plusieurs années à la recherche en sciences humaines, et plus particulièrement dans le domaine des interactions homme-machine, pour continuer d'examiner et de comprendre les attitudes (définies comme *une tendance psychologique qui est exprimée en évaluant une entité particulière avec un degré de faveur ou de défaveur*, Eagly & Chaiken, 1993, p.1) et les comportements des automobilistes à l'égard de la conduite complètement automatisée. Les questions que l'on peut se poser renvoient à la manière dont ces automobilistes reçoivent cette technologie, quelles attitudes ils ont quant à son utilisation et quels sont leurs comportements au sein de ce nouveau véhicule. Est-ce que les automobilistes acceptent ce nouveau mode de transport ? Qu'en pensent-ils ? Sont-ils prêts à l'utiliser ? Dans quelles conditions ? Il est nécessaire de comprendre les nouveaux usages que ce type de voiture implique et les compétences qu'il requiert. Ainsi, bien que les automobilistes puissent être conduits par leur véhicule, ils pourraient être amenés à en reprendre le contrôle manuel de manière urgente ou non. La question de la supervision est alors centrale dans le domaine de la conduite complètement automatisée.

Contexte et enjeux

La conduite complètement automatisée est utilisée aujourd'hui dans un cadre expérimental pour la développer. Les ingénieurs et fabricants de cette nouvelle technologie ne seront bientôt plus les seuls à y avoir accès en tant que conducteurs/conductrices. L'utilisation de cette technologie se fera dans les années à venir non plus sur piste, en circuit fermé mais au sein d'un trafic dynamique composé d'un parc automobile hybride (voitures complètement automatisées et voitures manuelles) et d'automobilistes aux profils divers et variés qui peuvent être distingués selon l'expérience de conduite, de style de conduite et les buts de déplacement. Par conséquent, il devient crucial d'examiner les facteurs humains en lien avec la conduite complètement automatisée, et à adapter certains concepts utilisés pour la conduite manuelle, pour appréhender au mieux les interactions entre l'homme et la machine dans cette nouvelle situation. Plus précisément, ce diptyque homme-machine renvoie à l'interaction entre l'automobiliste de l'ère de la voiture *manuelle* d'une part et la voiture *complètement automatisée* d'autre part.

La thèse s'inscrit dans un contexte particulier car cette technologie n'est pas encore disponible sur le marché, et ses conditions d'utilisation ne sont pas encore définies. La circulation sur piste de ce type de véhicule à des fins de recherche scientifique est encadrée par la loi aux Etats-Unis en Californie, Floride, Michigan, et au Nevada. Ce n'est pas encore le cas sur les routes publiques dans le monde, à l'exception de la *Google self-driving car* qui est autorisée depuis juin 2015 à rouler sur certaines portions de route dans la ville de Mountain View en Californie. En effet, à l'échelle mondiale, un vide juridique entoure la mise sur route de la voiture automatisée, notamment en ce qui concerne la responsabilité en cas d'accident. D'un point de vue civil, en France, le législateur indemnise systématiquement les victimes d'accident de la route, qu'ils soient provoqués par un véhicule complètement automatisé ou non. En revanche, d'un point de vue pénal, la loi n'est pas

encore à jour. L'article 121-1 du Code pénal stipule que *nul n'est responsable pénalement que de son propre fait*. De fait, la responsabilité pénale de l'automobiliste d'une voiture complètement automatisée dépendra avant tout du rôle passif ou actif qui lui est attribué. L'enjeu pour les constructeurs et les assurances est très important, car il convient de déterminer les usages possibles de la voiture complètement automatisée. Par exemple, est-il nécessaire que l'automobiliste surveille le système (rôle actif) ? S'il est nécessaire de surveiller le système, la conduite complètement automatisée perd une partie de son intérêt, car le conducteur a moins le champ libre pour s'engager pleinement dans une autre activité. En revanche, si la supervision n'est pas nécessaire, cela implique que le système soit fiable et que, même dans des situations imprévues, il puisse assurer la conduite du véhicule en toute sécurité.

La fiabilité d'un système pose la question de sa résilience. La résilience est définie comme *l'aptitude intrinsèque d'un système à ajuster son fonctionnement avant, pendant ou suite à des changements et des perturbations, pour qu'il puisse poursuivre son activité dans des conditions attendues ou inattendues* (Hollnagel, Paries, David, & Wreathall, 2010). Un système résilient est capable de résister à l'imprévu, de le gérer. La résilience d'un système est comparable à la capacité d'adaptation d'un être humain. Etant donné qu'il n'y a pas de système parfait, un système automatisé peut avoir une résilience élevée, mais pas absolue. De fait, un véhicule complètement automatisé gère tous les aspects de la conduite, parfois même mieux qu'un conducteur ; en revanche, parce qu'aucun système n'est parfait, ce système peut subir une défaillance, voire une panne. La résilience du système ferait en sorte que la conduite serait assurée dans certains cas grâce au principe de redondance des systèmes (lorsqu'un système ne fonctionne plus, un système de secours parallèle prend la relève et ainsi de suite). En cas de dysfonctionnement, le véhicule pourrait être en mesure de se mettre en position de sécurité (s'arrêter sur la bande d'arrêt d'urgence et activer les feux de détresse). Dans d'autres

cas plus critiques, comme lors d'une panne, l'intervention humaine serait nécessaire. C'est cette situation qui sera examinée dans la présente thèse.

Le problème inhérent à l'utilisation d'un système automatisé est le risque de sortir de la boucle de contrôle (Kaber & Endsley, 1997 ; Stanton & Young, 1998), c'est-à-dire être déconnecté à différents degrés de l'activité qu'un individu a initiée. Cela correspond à être plus ou moins désengagé, non seulement physiquement, mais aussi cognitivement de cette activité. Le contrôle de l'activité n'est plus total, il est partiel voire nul. Ce phénomène peut être problématique, notamment au regard de la législation. En effet, la réglementation française de la circulation routière est fondée sur le code de la route mais également sur la Convention de Vienne du 8 novembre 1968, dont l'article 8 stipule que :

- *tout véhicule en mouvement doit avoir un(e) conducteur/conductrice ;*
- *tout(e) conducteur/conductrice doit posséder les qualités physiques et psychiques nécessaires et être en état physique et mental de conduire ;*
- *tout(e) conducteur/conductrice de véhicule à moteur doit avoir les connaissances et l'habileté nécessaires à la conduite du véhicule ;*
- *tout(e) conducteur/conductrice doit constamment avoir le contrôle de son véhicule.*

A bord d'un véhicule en mode de pilotage automatique, l'individu derrière le volant est-il toujours conducteur ? Est-il spectateur, copilote, superviseur, passager ? Par ailleurs, le fait de vaquer à d'autres occupations ne risque-t-il pas de dégrader l'état physique (préhension d'un objet, endormissement, posture inadéquate pour conduire, etc.) et psychique (somnolence, vigilance, attention, conscience de la situation, etc.) des conducteurs lors de la reprise de contrôle manuel du véhicule, que cette manœuvre soit urgente ou non ? Les automobilistes auront-ils les connaissances (limites et potentiel du système) et habiletés nécessaires (engager le pilotage automatique, reprendre le contrôle de manière anticipée ou

urgente) pour conduire ce type de véhicule ? Enfin, les automobilistes auront-ils le contrôle de leur véhicule ? La Convention de Vienne évoque la notion de contrôle mais ce terme est vague, car il peut inclure aussi bien une dimension manuelle que cognitive.

Au regard de la législation actuelle, qui est en cours d'évolution pour encadrer l'utilisation des voitures automatisées, et des difficultés éprouvées lors de la reprise de contrôle manuel sur simulateur (Desmond, Hancock & Monette, 1998 ; de Waard, van der Hulst, Hoedemaeker, & Brookhuis, 1999 ; Hoc, Mars, & Milleville-Pennel, 2006), pratiquer la conduite complètement automatisée, puis être entraîné à cette nouvelle conduite semble être une mesure permettant de faciliter la transition entre l'utilisation d'une voiture non automatisée et une voiture complètement automatisée. Activer le pilotage automatique et reprendre le contrôle du véhicule correspond au niveau 1 *maniement du véhicule* et 2 *maîtrise des différentes situations de conduite* de la matrice Goals for Driver Education (GDE) (Hatakka, Keskinen, Gregersen, Glad, & Hernetkoski, 2002). Ces niveaux font référence aux compétences élémentaires de maîtrise d'un véhicule classique, et peuvent être enseignés dans le cadre d'une formation à la conduite.

Le parti pris dans cette thèse est d'étudier un véhicule dont la conduite est complètement automatisée, capable de rouler en situation normale sans l'intervention ni la supervision de l'automobiliste, d'effectuer toutes sortes de manœuvres et d'interagir avec les autres véhicules. Le niveau choisi d'automatisation du véhicule est donc maximal, et nous avons considéré qu'il pourrait être enclenché dans des zones dédiées à cette fonctionnalité.

De la conduite manuelle à la conduite complètement automatisée

La population qui aura accès à cette technologie sera probablement constituée d'automobilistes ayant le permis de conduire automobile tel qu'on le connaît aujourd'hui. A l'échelle internationale (les pays ayant signé la Convention de Vienne de 1968 sur la sécurité routière), le permis B renvoie à l'aptitude à piloter un véhicule motorisé de moins de 3,5 tonnes. Il paraît légitime de se demander si ce permis tel qui est actuellement permet de bien préparer à l'utilisation d'un véhicule complètement automatisé. En France, cet examen évalue la capacité à la conduite des candidat(e)s sur six points (Arrêté du 02 juillet 2014 - art. 1) :

1. respect des dispositions du Code de la route

Le premier point stipule que le code de la route doit être respecté. A priori, un système informatique automatisé fonctionne selon des règles établies par ses concepteurs ; sa manière de conduire suivra donc les règles du code de la route. En revanche, la possible utilisation détournée d'un tel système par les utilisateurs est moins prévisible. Par exemple, il n'est pas improbable que des automobilistes utilisent une voiture complètement automatisée alors qu'ils/elles ne le devraient pas, par exemple en état d'ébriété ou de fatigue avancée. En effet, d'après le modèle de l'homéostasie de la difficulté perçue de la tâche (Fuller, 2005), les individus sont motivés à maintenir un niveau de difficulté cible. Si la conduite devient plus facile, ils pourraient être amenés à augmenter la prise de risque pour compenser, en utilisant par exemple la conduite automatisée alors qu'ils ne sont pas en état de conduire.

2. connaissance du véhicule et la capacité à déceler les défauts techniques les plus importants

Le deuxième point concerne l'exigence faite aux automobilistes de connaître les caractéristiques techniques de leur véhicule pour être capable de trouver d'éventuels défauts ou dysfonctionnements avant de l'utiliser. Etant donnée la multitude de

dispositifs qui sera probablement ajoutée aux véhicules complètement automatisés pour qu'ils roulent sans intervention humaine (LIght Detection and Ranging [LIDAR], capteurs, récepteurs, caméras etc.), de nouvelles connaissances devraient, selon toute cohérence, être assimilées par les automobilistes pour respecter le code de la route actuel.

3. *maîtrise des commandes et de la manipulation du véhicule pour ne pas créer de situations dangereuses*

La maîtrise des commandes paraît également applicable à la conduite complètement automatisée, dans la mesure où il faudra enclencher le pilotage automatique et reprendre la main sur la conduite. Cette reprise en main peut se faire de manière anticipée, mais également dans des situations d'urgence lorsque le véhicule n'est plus en mesure de gérer une situation de conduite. Ces capacités requises lors de l'examen du permis B sont-elles transférables à la conduite automatisée ou nécessitent-elles un apprentissage ?

4. *capacité à assurer sa propre sécurité et celle des autres usagers sur tout type de route, à percevoir et à anticiper les dangers engendrés par la circulation et à agir de façon appropriée*

La conduite complètement automatisée peut permettre à l'automobiliste d'utiliser un véhicule alors qu'il n'est pas en état physique ou psychique de conduire (fatigue, ébriété, effets secondaires médicamenteux...). Il semble donc nécessaire de sensibiliser les automobilistes à l'utilisation du pilotage automatique afin d'assurer leur sécurité et celle des autres usagers de la route (piétons, cyclistes, motocyclistes, automobilistes). Les transitions entre les modes de pilotage, manuel à automatique vs. automatique à manuel, seraient le cœur de cette notion d'anticipation des dangers. En effet, assurer le contrôle du véhicule lors de ces phases de délégation ou de reprise de

contrôle implique de pouvoir les anticiper et d'être en état physique et psychique de coopérer avec le système.

5. *degré d'autonomie dans la réalisation d'un trajet*

Nous pouvons nous poser la question de l'effet de l'utilisation prolongée de la conduite complètement automatisée sur des compétences de conduite. Il est probable que des compétences se détériorent si elles ne sont plus utilisées, comme cela a été observé chez les pilotes professionnels d'avions (Federal Aviation Administration [FAA], 2013a). Par ailleurs, sommes-nous en mesure de comprendre rapidement la situation de conduite et de prendre des décisions après de longues périodes d'exposition à l'automatisation lorsque le pilotage automatique doit être désactivé ?

6. *capacité à conduire dans le respect de l'environnement et à adopter un comportement courtois et prévenant envers les autres usagers, en particulier les plus vulnérables*

Les algorithmes utilisés par la conduite complètement automatisée visent à respecter le code de la route, assurer au mieux la sécurité du véhicule et favoriser la conduite écologique en privilégiant une conduite souple et régulière. Cependant, la question de l'adaptabilité de cette technologie dans un environnement dynamique se pose tant que le parc automobile comprendra des véhicules classiques. De plus, la conduite particulière d'un véhicule complètement automatisé, basée sur le suivi très régulier des lignes de marquage au sol, et qui s'apparentera probablement à une conduite sur rails, pourrait dérouter les automobilistes de véhicules classiques qui ont tendance à couper la trajectoire en virage afin de limiter les effets sur le corps de la force centrifuge.

La formation actuelle au permis B ne semble donc pas préparer de manière suffisante les automobilistes à l'utilisation d'une voiture complètement automatisée. A l'instar de la conduite manuelle, la conduite complètement automatisée requerrait un savoir-faire et un savoir-être, mais également un savoir-coopérer qui renvoie à l'interaction homme-machine,

car les automobilistes sont en interaction avec un système informatisé (Millot & Lemoine, 1998). Bien que ces trois types de savoirs soient importants, l'objet de notre recherche se porte en priorité sur les savoir-faire qui constituent le premier niveau d'interaction avec la voiture complètement automatisée.

La reprise de contrôle

La commercialisation de la voiture complètement automatisée étant un futur possible, nous avons choisi d'étudier les niveaux d'automatisation les plus élevés. La démarche entreprise dans cette thèse est d'évaluer en partie l'impact de ce niveau maximal d'automatisation sur cette interaction homme-machine. L'un des principaux enjeux de cette interaction est la reprise de contrôle manuel du véhicule. Cette manœuvre, nouvelle, permet la transition de la conduite complètement automatisée à la conduite manuelle. Elle pourrait être réalisée dans des conditions plus ou moins urgentes. Une reprise de contrôle anticipée semble de prime abord être réalisable par tous. En revanche, une reprise de contrôle en situation d'urgence (par exemple lors de défaillances du système) pourrait poser des difficultés aux conducteurs. Que se passerait-il si le conducteur devait reprendre le contrôle du véhicule en cas de dysfonctionnement ? Qui plus est, l'environnement de conduite (densité du trafic, vitesse, visibilité, trajectoire du véhicule), ainsi que la possibilité de vaquer à d'autres occupations lorsque l'on est conduit, pourraient avoir des conséquences sur la reprise de contrôle. Ces conséquences paraissent importantes à évaluer avant que la voiture complètement automatisée ne soit accessible à tous les conducteurs. Le contrôle du véhicule comprend une dimension physique (maîtrise du véhicule) et cognitive (compréhension et traitement des informations dans le véhicule et dans l'environnement). Dans un véhicule complètement automatisé, la conduite peut être reléguée au rang de tâche secondaire, c'est-à-dire une tâche de fond qui pourrait être reprise à tout moment. La conduite, une fois déléguée,

peut être supervisée, que ce soit obligatoire ou facultatif, mais aussi en fonction de la confiance et de l'acceptabilité des conducteurs à l'égard de cette technologie.

Questions de recherche

La première question de recherche est la suivante : la conduite complètement automatisée est-elle acceptée par les conducteurs ? Afin d'analyser les représentations et les utilisations de cette nouvelle interaction homme-machine, nous prendrons en compte les attitudes des automobilistes à l'égard d'une voiture complètement automatisée ainsi que leurs comportements dans celle-ci. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux attitudes. Elles permettent d'appréhender et de donner du sens aux comportements observés, d'autant plus lorsque l'objet étudié est nouveau, qu'il n'est pas diffusé à l'ensemble de la population et que des questions de performance de l'interaction homme-machine (conducteur et voiture complètement automatisée) et de sécurité des personnes sont en jeu. Deux concepts vont constituer le point d'ancrage de l'étude des attitudes envers la conduite complètement automatisée : l'acceptabilité et la confiance. L'acceptabilité est importante car les aides à la conduite (Advanced Driver Assistance System [ADAS]) qui réduisent le contrôle de la conduite (la prise de décision) pourraient être acceptées difficilement (van der Laan, Heino, & de Waard, 1997). En outre, l'utilisation de ces dispositifs peut être *a priori* jugée négativement par certains automobilistes car ces derniers considèrent que leurs utilisateurs ont de mauvaises compétences de conduite (Lefevre, Bordel, & Guingouain, 2008). De fait, il est légitime d'évaluer l'acceptabilité d'un véhicule complètement automatisé dans la mesure où l'acceptabilité d'une automatisation partielle de la conduite n'est pas nécessairement élevée. L'acceptabilité d'une technologie renvoie notamment à l'utilité et à la facilité d'utilisation perçues (Davis, Bagozzi, & Warshaw, 1989), aux intentions d'usage (Venkatesh & Davis, 2000) et à la perception sociale de cette technologie (Malaterre & Saad, 1984). Concernant la confiance, elle est considérée comme un facteur important de la performance

d'un système automatisé (Lee & Moray, 1992), et comme un des principaux prédicteurs de l'utilisation d'un système automatisé (Parasuraman & Riley, 1997). L'étude de la confiance semble essentielle pour mieux comprendre les comportements dans un véhicule complètement automatisé. Elle peut être définie comme *l'attitude à l'égard d'un agent qui va aider à réaliser les objectifs d'un individu dans une situation caractérisée par l'incertitude et la vulnérabilité* (Lee & See, 2004, p.54). La confiance peut être mesurée comme une attitude, notamment lorsqu'elle est évaluée *a priori*, elle peut être également mesurée comme un comportement lorsqu'elle est observée en situation. Par exemple, la supervision du système peut être obligatoire ou non, et les conducteurs pourront vérifier à leur gré que la conduite est entre de bonnes mains en regardant la route ou d'autres indicateurs de bon fonctionnement du système (statut, tableau de bord, etc.). L'acceptabilité et la confiance sont des concepts dynamiques (Cohen, Parasuraman, & Freeman, 1998) et peuvent donc être examinés *a priori*, pendant l'interaction et *a posteriori*. Les intentions d'utilisation de la conduite complètement automatisée sont également un des composants permettant de prédire les comportements à l'égard d'un tel système (Davis *et al.*, 1989).

La manière dont le contrôle du véhicule est repris par le conducteur en fonction de son expérience (en termes de conduite manuelle et de conduite complètement automatisée) et de la situation de conduite constitue notre deuxième question de recherche. Après avoir analysé les attitudes envers la conduite complètement automatisée, nous examinerons les comportements dans une voiture complètement automatisée dans le cadre d'études sur simulateur, et plus particulièrement lors de la transition entre les modes de pilotage. Il s'agit ici du passage de la conduite manuelle à la conduite complètement automatisée mais également du passage de la conduite complètement automatisée à la conduite manuelle, cette dernière transition impliquant une reprise de contrôle réalisée par l'automobiliste. A ce titre, des indicateurs quantitatifs et qualitatifs seront utilisés pour permettre d'évaluer la

performance de la conduite automatisée lors de reprises de contrôle. Il sera ici question de temps de réponse et de précision dans l'utilisation des pédales. Ces indicateurs quantitatifs et qualitatifs de la performance de conduite complètement automatisée constituent une nouveauté dans la mesure où certains indicateurs ont été examinés, tels que le contrôle latéral ou l'inter-distance entre véhicules (Brandenburg & Skottke, 2014 ; Skottke, Debus, Wang, & Huestegge, 2014), mais à des degrés d'automatisation moindres. L'examen de ces comportements peut se faire dans des situations normales mais également dégradées, comme lors d'une urgence, d'un dysfonctionnement ou encore lors d'une panne du système.

Plan de thèse

Outre l'introduction (chapitre I), cette thèse est constituée de cinq chapitres : deux chapitres qui composent le cadre théorique (chapitres II et III), la problématique (chapitre IV), la recherche empirique qui comprend trois études (chapitre V), et enfin la discussion générale et la conclusion (chapitre VI). Dans le chapitre II, nous nous intéresserons à l'automatisation. Nous commencerons par définir ce concept. L'automatisation d'un système ne se fait pas nécessairement de manière binaire, elle peut être nuancée et progressive. Nous verrons les différents niveaux d'automatisation que peut avoir un système. Ce faisant, nous articulerons les niveaux d'automatisation avec les interactions qu'un être humain peut avoir avec un système automatisé. Seront introduits dans cette partie différents modèles cognitifs sur les interactions et la coopération homme-machine (Hoc, 2001 ; Hoc, Young & Blosseville, 2009). Enfin, nous définirons le concept de contrôle qui est intrinsèque aux interactions homme-machine. Ces définitions nous permettront d'aborder l'automatisation appliquée à la conduite automobile. Nous décrirons dans un premier temps ce qu'est la conduite classique du point de vue de la psychologie et des sciences humaines. Puis nous introduirons les différentes aides à la conduite (ADAS) qui contribuent à l'automatisation de la conduite, pour atteindre un niveau d'automatisation complet. Deux nomenclatures (NHTSA et SAE) qui catégorisent la

conduite automatisée en différents niveaux seront ensuite décrites. Enfin, nous détaillerons l'évolution de la conduite automatisée pour conclure sur les incertitudes législatives concernant cette technologie en plein essor.

Le troisième chapitre traitera des facteurs humains lors de l'utilisation d'un système automatisé. Dans un premier temps, nous introduirons les différentes dimensions et concepts, dont des attitudes, pouvant potentiellement impacter l'utilisation d'un système automatisé, et notamment d'une voiture automatisée. Il sera question de boucle de contrôle (Kaber *et al.*, 1997), de conscience de la situation (Endsley, 1995), de charge de travail (évaluer l'impact d'un système automatisé sur les capacités cognitives et physiques de l'utilisateur, impact qui peut être modéré, fort ou faible) (Young & Stanton, 2011), et de facteurs de personnalité tels que le locus de contrôle (croyances des individus sur la causalité des événements qu'ils vivent ; Rotter, 1966) et la recherche de sensations (besoin des individus de vivre des expériences nouvelles, différentes et complexes, et de prendre des risques pour les expérimenter ; Zuckerman, 1979). Dans un second temps, nous introduirons l'acceptabilité de cette technologie (Davis *et al.*, 1989) qui permet dans une certaine mesure de prédire ses usages et de recueillir des informations sur la représentation que s'en font les futurs usagers. Ensuite, nous distinguerons l'acceptabilité de la confiance (Lee & See, 2004) dans une nouvelle technologie. Ces deux concepts étant dynamiques, il sera pertinent de les mesurer avant, pendant et après interaction avec la conduite automatisée, mais également de les évaluer en fonction de différentes expériences vécues par des individus dans un cadre expérimental. Les automobilistes devraient avoir la possibilité de s'engager dans des activités non reliées à la conduite (comme rédiger des emails, résoudre des problèmes, se divertir, etc.) lorsque le pilotage automatique est enclenché. Ces activités pourront être plus ou moins exigeantes d'un point de vue cognitif et physique, et pourront avoir un impact sur la reprise de contrôle. Nous ferons référence ici à la charge de travail (équilibrée, trop faible ou trop

importante), au contrôle ainsi qu'à la posture du corps (encombrement des membres par des objets, position des pieds et des mains, etc.). Dans le cas de la réalisation d'une autre tâche que la conduite par l'automobiliste lorsque le pilotage automatisé est actif, le statut de la conduite en tant que tâche principale vs. tâche secondaire sera débattu. Par la suite, nous présenterons les compétences en jeu lors de la conduite manuelle selon la matrice GDE. En outre, nous décrirons les nouvelles compétences nécessaires aux automobilistes pour l'utilisation d'un système de pilotage automatique. Enfin, ces nouvelles compétences mises en évidence devront être expliquées, pratiquées et apprises pour optimiser l'utilisation d'une voiture complètement automatisée. Deux catégories de compétences seront articulées : la connaissance de la technique et de la logique du système de pilotage automatique, qui est un savoir accessible dans la mémoire à long terme, et la réalisation des nouvelles manœuvres nécessaires lors de l'utilisation de ce système, qui relève de la mémoire procédurale.

Ces deux chapitres nous amèneront à formuler dans le chapitre IV la problématique de cette thèse. Nous chercherons à savoir dans quelle mesure la conduite complètement automatisée nécessite un apprentissage de la part d'automobilistes tout-venant, comment apprendre à utiliser un véhicule automatisé et quels éléments constituent cet apprentissage. Nous analyserons la performance de la conduite automatisée, notamment la reprise de contrôle en situation d'urgence, en fonction des caractéristiques de l'automobiliste (acceptabilité, confiance, expérience de conduite, genre, âge), de la réalisation de tâches non reliées à la conduite, mais également de l'entraînement qu'il/elle aura suivi pour conduire un véhicule complètement automatisé en toute sécurité.

Dans le cinquième chapitre de la thèse, nous présenterons les trois études empiriques qui ont été réalisées (Payre, Cestac, & Delhomme, 2014, 2015a, 2015b). La première étude, adossée à deux études pilotes constituées pour l'une d'elles d'entretiens semi-directifs auprès d'automobilistes, pour l'autre d'un questionnaire sur les attitudes à l'égard de cette

technologie, a permis de créer une échelle d'acceptabilité *a priori* de la conduite complètement automatisée. Cette première étude a pour but de comprendre comment les automobilistes appréhendent la conduite complètement automatisée, s'ils l'acceptent, et pourquoi et dans quelles conditions ils souhaiteraient l'utiliser. Les études suivantes ont été menées sur un simulateur de conduite de l'Ifsttar et visent à expliciter comment apprendre à utiliser cette technologie, avec une focale sur la reprise de contrôle en situation d'urgence. La deuxième étude est consacrée aux effets de la pratique de la conduite automatisée et de la confiance sur le temps de réponse d'une reprise de contrôle en cas de panne du système. L'acceptabilité *a priori* et *a posteriori* sont mesurées grâce à l'échelle construite dans la première étude. Des entretiens post expérimentaux ont été menés afin de recueillir les impressions des participants. La troisième étude explore davantage la pratique de la conduite automatisée et la fait évoluer en entraînement (qui comprend une formation pratique et théorique). La réalisation d'une tâche non liée à la conduite, lorsque le pilotage automatique est activé, est une variable indépendante ajoutée au protocole expérimental au regard des nouvelles opportunités offertes aux conducteurs lors de l'utilisation de cette technologie.

Les résultats de ces trois études seront discutés dans le sixième et dernier chapitre. Le rôle du conducteur et la nature de la tâche de conduite seront questionnés. L'apport pratique et théorique de la thèse, notamment vis-à-vis de l'apprentissage de la reprise de contrôle manuel, sera évoqué. Enfin, nous présenterons les limites de nos études et les perspectives pour les recherches à venir.

Chapitre II :

Automatisation et conduite automobile

Chapitre II : Automatisation et conduite automobile

Bien que l'automatisation ait été appliquée progressivement à la conduite, via différentes fonctions automatisées comme le freinage antiblocage de roues (Antilock Breaking System [ABS]), une nouvelle manière de conduire va apparaître dans les années à venir. En effet, avec la volonté partagée des constructeurs automobiles d'automatiser le plus possible la conduite et de diffuser cette technologie, les individus derrière le volant de leur véhicule devraient pouvoir déléguer complètement la conduite à un système informatique. Ils/elles seront donc conduits par le véhicule, ce qui implique des changements dans la manière d'utiliser sa voiture.

Dans ce deuxième chapitre, nous allons définir ce qu'est l'automatisation d'un système et les relations en jeu lorsque des individus utilisent un système automatisé. Les notions de niveaux d'automatisation et d'interaction homme-machine seront développées. Puis, l'automatisation et les interactions homme-machine seront étudiées dans le contexte de la conduite automobile. Nous introduirons des modèles cognitifs de la conduite manuelle, puis articulerons conduite manuelle et automatisation en faisant une revue des aides à la conduite puis une description de la conduite automatisée. Ensuite, nous rendrons compte de l'évolution de la conduite automatisée, de ses balbutiements jusqu'à nos jours. Enfin, nous évoquerons la législation et les infrastructures de conduite qui tentent d'accompagner de concert l'évolution et le développement de la conduite automatisée. A ce titre, la question de la responsabilité de la conduite dans un véhicule complètement automatisé sera soulevée au regard du cadre législatif actuel.

L'automatisation est développée de manière générale dans cette partie, pour ensuite être appliquée au domaine de la conduite automobile, afin de répondre à la question *qu'est-ce*

que la conduite automatisée et par extension qu'est-ce que la conduite complètement automatisée ?

1. L'automatisation

1.1. Définition

Parasuraman et Riley (1997) définissent l'automatisation comme l'exécution par une machine, généralement un ordinateur, d'une fonction préalablement prise en charge par un humain. Billings (1997, p.201) la décrit comme étant *conçue pour travailler de manière coopérative avec les opérateurs humains à la réalisation d'objectifs définis*. Un opérateur est un individu exerçant une activité dans un cadre professionnel. Billings considère que les opérateurs doivent rester maîtres du système, et en fait un axiome. En outre, l'opérateur doit être impliqué dans le système et informé de manière adéquate sur le statut de l'automatisation. Ce retour d'information est appelé *feedback*. Donner un feedback, c'est renvoyer à l'utilisateur l'information concernant l'action effectuée, et quel est le résultat de cette action (Norman, 1988). Norman utilise comme exemple de feedback entendre le son de sa voix quand on parle, et voir ce que l'on écrit avec un stylo. Billings ajoute concernant l'automatisation qu'il est essentiel que les humains et le système automatisé comprennent leurs intentions mutuelles lorsqu'ils interagissent au sein de systèmes *complexes*.

1.2. Les niveaux d'automatisation

L'automatisation d'un système peut se réaliser dans des proportions diverses qu'on appelle les niveaux d'automatisation. Ces niveaux font référence aux degrés auxquels une fonction particulière est attribuée au contrôle de la machine (Sheridan, 1992). Sheridan (1992), repris par Wickens (1998), a élaboré une classification des degrés d'automatisation de la prise de décision :

Tableau 1 : Hiérarchisation des niveaux d'automatisation de la prise de décision, d'après Sheridan (1992).

Niveaux supérieurs	10. L'ordinateur décide de tout, agit de manière autonome, et ignore l'humain 9. Il informe l'humain seulement si l'ordinateur l'a décidé 8. Il informe l'humain seulement si on le lui a demandé 7. Exécute automatiquement, et après en informe nécessairement l'humain 6. Permet à l'humain de poser son veto dans un temps restreint avant l'exécution automatique 5. Exécute une suggestion si l'humain l'approuve 4. Suggère une alternative
Niveaux inférieurs	3. Réduit la sélection à quelques choix 2. L'ordinateur offre une panoplie complète de décision/action alternatives 1. L'ordinateur n'offre pas d'assistance : l'humain doit prendre toutes les décisions et réaliser toutes les actions

Cette échelle décrivant les différents niveaux possibles d'automatisation prend en compte les paramètres de décision et de sélection de l'action, autrement dit les fonctions *outputs*. Toutefois, l'automatisation peut tout aussi bien servir à collecter de l'information et à la trier, ce qui correspond à des fonctions *inputs*. Parasuraman, Sheridan et Wickens (2000) suggèrent une décomposition des fonctions de l'automatisation en quatre catégories :

- L'acquisition de l'information
- L'analyse de l'information
- La sélection de la décision et de l'action
- La réalisation de l'action

Chacune de ces fonctions peut être automatisée à différents degrés ou niveaux. La classification de Sheridan (Tableau 1) peut être utilisée pour décomposer la prise de décision, bien qu'il faille apporter des modifications en fonction du système automatisé. En effet, les besoins des utilisateurs de systèmes automatisés ne sont pas nécessairement assurés dans la mesure où toutes les fonctionnalités n'ont pas pu être implémentées dans la conception de ces systèmes (Bainbridge, 1983 ; Parasuraman & Riley, 1997). Une classification plus générale

des degrés d'automatisation, applicable à tous les types d'automatisation, inclurait cinq niveaux : (0) nul, (1) faible, (2) moyen, (3) fort, (4) total (Parasuraman, 2000).

La taxonomie en dix niveaux d'un système automatisé d'Endsley *et al.* (1997) est un modèle applicable à un large panel de domaines, notamment la navigation et le contrôle aérien dont se rapproche la conduite de voitures automatisées (Tableau 2). La conduite complètement automatisée se situerait aux niveaux 9 ou 10, en fonction de la nécessité de superviser le système. A la différence du modèle de Sheridan, cette classification est plus précise dans la description des différents niveaux d'automatisation et implémente quatre principales fonctions de l'automatisation. Pour chaque niveau de chaque fonction, cette taxonomie indique qui de l'humain, de l'ordinateur ou des deux est le plus à même de prendre en charge les tâches en fonction de ses propres capacités.

Tableau 2 : Taxonomie des niveaux d'automatisation, d'après Endsley *et al.*, (1997).

Niveau d'automatisation	Fonctions			
	Contrôler	Générer	Sélectionner	Implémenter
1. Contrôle manuel	Humain	Humain	Humain	Humain
2. Support à l'action	Humain/Machine	Humain	Humain	Humain/Machine
3. Traitement par lot	Humain/Machine	Humain	Humain	Machine
4. Contrôle partagé	Humain/Machine	Humain/Machine	Humain	Humain/Machine
5. Support de la décision	Humain/Machine	Humain/Machine	Humain	Machine
6. Prise de décision mixte	Humain/Machine	Humain/Machine	Humain/Machine	Machine
7. Système rigide	Humain/Machine	Machine	Humain	Machine
8. Prise de décision automatique	Humain/Machine	Humain/Machine	Machine	Machine
9. Contrôle en supervision	Humain/Machine	Machine	Machine	Machine
10. Automatisation totale	Machine	Machine	Machine	Machine

La décomposition des fonctions diffère de celle de Parasuraman pour les deux premières fonctions. Le premier niveau, celui du *contrôle*, correspond au relevé des informations affichées pour connaître le statut du système ; il comprendrait donc les deux premiers niveaux du modèle de Parasuraman, c'est-à-dire l'acquisition et l'analyse de l'information. Le deuxième niveau, *générer*, renvoie à la formulation de stratégies pour accomplir les objectifs du système. Le troisième niveau, *sélectionner*, fait écho au choix d'une stratégie particulière, et le dernier niveau, *l'implémentation*, correspond à la réalisation de la stratégie choisie.

Enfin, le modèle quantitatif de Wei, Macwan et Wieringa (1998) propose de déterminer le niveau d'automatisation adéquat d'un système en fonction de la complexité des tâches à réaliser. Les tâches sont hiérarchisées selon leurs effets sur les performances du système, les exigences qu'elles demandent aux opérateurs et enfin la charge mentale qu'elles provoquent chez les opérateurs. La charge mentale peut être définie comme la quantité d'information traitée cognitivement par un individu. Dans ce modèle, le degré d'automatisation évalué correspond au ratio de la somme des coûts des tâches automatisées sur la somme des coûts de toutes les tâches inhérentes au système. L'intérêt est de considérer les tâches comme un tout, puis d'examiner leurs impacts sur la charge de travail de l'opérateur et sur les performances du système. Wei *et al.* (1998) suggèrent que ce modèle pourrait être utilisé afin d'évaluer un niveau d'automatisation approprié pour optimiser les performances du système, et maintenir l'humain à un rôle approprié dans le système. La limite de ce système lorsqu'on l'applique à la conduite automatisée est qu'il prend en compte la charge mentale induite chez les opérateurs, mais la charge physique n'est pas explicitement énoncée. Lorsque le pilotage automatique est activé, il est possible que l'automobiliste s'engage dans une autre tâche que conduire (lire des emails, manger, etc.) ce qui implique que ses membres supérieurs soient occupés à manipuler des objets. Les pieds peuvent également

être dans une position peu adéquate à la conduite (pieds allongées ou croisées). La posture de l'automobiliste peut alors être problématique lorsqu'il est nécessaire de reprendre le contrôle du véhicule. Elle peut impacter la charge mentale en ce sens où la prise de décision peut être plus difficile pour décider de la manière de reprendre le contrôle (garder les objets en main s'ils sont peu encombrants et reprendre le contrôle, ou s'en débarrasser s'ils sont encombrants, dans ce cas, il faut choisir où et comment s'en débarrasser). Cette variable est donc à prendre en considération au même titre que la charge mentale.

La possibilité de pouvoir configurer un système selon différents niveaux d'automatisation permet de résoudre certains problèmes de performance liés à la sortie de l'opérateur de la boucle de contrôle du système. Ainsi, par rapport à une approche technologique qui n'évalue que les capacités de la machine et lui alloue autant de responsabilité que possible, tout en laissant les tâches restantes à l'opérateur, les avantages potentiels d'une automatisation dosée et flexible sont importants (Kaber *et al.*, 1997).

Déterminer des niveaux d'automatisation nécessite en premier lieu d'identifier les fonctions du système faisant interagir l'homme et la machine : le contrôle (surveillance), la planification, la prise de décision et la réalisation des actions choisies. Ensuite, il convient de déterminer quelles tâches à réaliser constituent les dites fonctions. Par exemple, contrôler implique la reconnaissance et l'interprétation de signaux, ou encore une lecture de l'information. Ces fonctions sont confiées à l'humain ou à la machine selon leurs propres capacités et compétences dans des conditions opérationnelles normales et d'échec. Dans le contexte de la conduite automatisée, il est facile d'imaginer que l'ordinateur collecte des informations sur le trafic (circulation dense), les analyse (estimation du retard potentiel, itinéraire alternatif possible) et laisse à l'automobiliste le choix (rester dans la congestion, prendre un autre itinéraire) de la suite des opérations (laisser le système de conduite automatisée gérer la circulation dans le trafic, ou prendre le contrôle manuel pour se diriger

vers un autre itinéraire). Implémenter des niveaux d'automatisation à un système présente trois principaux avantages (Kaber *et al.*, 1997) :

- maintenir de manière adéquate l'implication de l'opérateur dans la tâche de contrôle ainsi que sa charge de travail afin de réduire les effets de contentement, le manque de vigilance et de connaissance de l'état du système en prenant en compte les performances de l'humain et de l'ordinateur lors des situations d'échec ;
- diminuer les erreurs du système causées par la mauvaise qualité de la prise de décision automatisée, en se fiant aux capacités de prise de décision de l'humain ;
- améliorer les performances du système via le traitement de données de l'ordinateur.

Par exemple, concernant le contrôle de trafic aérien, il est recommandé d'intégrer des niveaux d'automatisation élevés pour l'acquisition et l'analyse d'information, et des niveaux moyennement automatisés pour la prise de décision et l'action (Parasuraman, Sheridan & Wickens, 2000).

1.3. Les interactions homme-machine dans un système automatisé

Qu'est-ce qu'implique l'automatisation ?

L'automatisation d'un système implique l'interaction entre l'homme et la machine. Une interaction peut être définie comme une action réciproque entre des individus et/ou des objets leur permettant d'entrer en contact. Nous considérons le système homme-machine comme un tout plutôt que comme un assemblage d'entités indépendantes les unes des autres. Toutefois, il est nécessaire d'explicitier ce qui crée le liant de cette construction. Millot et Lemoine (1998) parlent d'un savoir-coopérer, qui constitue l'étape suivante du savoir-faire de la machine. La coopération homme-machine implique une situation dynamique d'échanges et d'interactions entre l'homme et la machine. Elle est définie comme l'interférence entre deux agents (hommes et/ou machines), dans le but rendre plus facile les tâches individuelles et communes (Hoc, 2001). Trois différents niveaux de coopération, de plus en plus coûteux et de plus en plus abstraits, sont décrits par Hoc :

- *la coopération dans l'action* : elle renvoie aux activités réalisées sur le court terme, à un niveau d'interférence local ;
- *la coopération dans la planification* : elle correspond aux activités réalisées à moyen terme qui consistent à réaliser ou faire perdurer un référentiel commun (un but, les rôles à partager, un plan etc.) ;
- *la méta-coopération* : elle fait référence à un niveau d'abstraction élevé pour optimiser la coopération sur le long terme. Pour ce faire, les agents construisent un modèle de soi-même et du/des partenaire(s).

L'automatisation dont il est sujet dans cette thèse concerne un objet automatisable, le véhicule, et l'individu qui interagit avec, l'automobiliste. Le système est composé ici de deux agents. Hoc (2001) parle de coopération de ces deux agents dans le système s'ils :

- réalisent chacun des objectifs, et que chaque agent puisse interagir avec l'autre au niveau des objectifs, des résultats ou des procédures ;
- gèrent ces interactions pour que chaque agent parvienne à faciliter sa propre tâche, celle de l'autre et/ou une tâche commune si elle existe.

La relation coopérative des agents n'est pas nécessairement symétrique et équilibrée. Les agents interfèrent entre eux pour favoriser le fonctionnement du système, que ce soit d'un point de vue local ou collectif. Ainsi, la coopération entre l'automobiliste et le véhicule automatisé pose la question de l'équilibre de la coopération. Hoc (2000) considère que dans ce cas la coopération est asymétrique. L'automobiliste gère l'interférence entre les deux agents dans des proportions beaucoup plus importantes que le système de conduite automatisé. Afin de détailler les interférences avec plus de précision que ne le font les niveaux de coopération, quatre modes d'interférences ont été catégorisés par Hoc et Blosseville (2003) puis par Hoc, Young et Blosseville (2009) (Tableau 3) dans le cadre de la conduite automatisée :

- le mode perceptif : le système améliore la perception de l'environnement de l'automobiliste en lui proposant des informations fines qu'il/elle ne pourrait pas obtenir, ou uniquement grâce à une expertise avancée.
- le mode de contrôle mutuel : il renvoie à la surveillance de l'activité de l'automobiliste par le système de conduite automatisé. Cela sert à avoir un retour d'informations sur l'activité réalisée en obtenant une évaluation : un avertissement (signal sonore pour prévenir d'une collision), une suggestion d'action (un signal lumineux sur le tableau de bord pour conseiller à l'automobiliste de passer une vitesse), une limitation (la pédale d'accélération qui se rigidifie lors que la vitesse du véhicule dépasse celle du limiteur de vitesse), une correction (le système donne un coup de volant lorsque le véhicule sort dangereusement d'une voie).

- le mode de délégation de fonction : ce mode correspond au choix de l'automobiliste de confier une ou plusieurs activités de la conduite au système automatisé. L'automobiliste peut assurer certaines fonctions de la conduite, mais doit en retour superviser le bon fonctionnement du système homme-machine, et décider des moments où la délégation commence et se termine. La supervision est un état dans lequel *les humains n'agissent pas directement sur le processus qui est contrôlé [...]. Ils observent les actions d'un ordinateur et les approuvent ou les désapprouvent. [...]* Un contrôleur et superviseur humain indique et regarde les signaux pouvant témoigner de la nécessité d'une intervention pour prévenir la réalisation d'erreurs du processus (Kaber et al., 1997).
- le mode complètement automatisé : le système de conduite gère de lui-même la conduite sans l'intervention l'automobiliste. Cela prend en compte le contrôle latéral et longitudinal du véhicule.

Les quatre modes de coopération homme-machine sont mis en relation avec les niveaux de coopération dans le tableau suivant, en s'appuyant sur l'exemple d'un système d'aide à la conduite.

Tableau 3 : Grille de lecture des croisements des niveaux et modes de coopérations, d'après Hoc, Young & Blosseville (2009).

	Méta-coopération	Coopération dans la planification	Coopération dans l'action
Mode perceptif	Modèles des capacités perceptives de l'automobiliste (limites de la vision)	Compensation des limites visuelles de l'automobiliste (avertisseur d'angle mort)	Amélioration de la vision via des dispositifs tête haute (présentation plus claire de la courbure d'un virage)
Mode de contrôle mutuel - Mode avertissement - Mode suggestion d'action - Mode limitatif	Efficacité du type de feedback utilisé pour provoquer une réponse adaptée de l'automobiliste (ex. : auditif, tactile, haptique)	Connaissance des intentions de l'automobiliste (ex. : avertissement uniquement si le clignotant n'est pas actionné lors d'un changement de direction)	Dispenser une information appropriée aux circonstances (ex. : alerte sonore latérale, résistance du volant)
Mode de délégation de fonctions	Modèles du comportement de l'automobiliste et de ses représentations mentales (privilégier les actions de l'automobiliste; contrôler la fonction si besoin est)	Délégation d'activités au système automatisé (feedback sur le mode du système; acceptation des consignes données par l'automobiliste)	Exécution des requêtes de l'automobiliste (assistance au maintien dans la voie et contrôle latéral du véhicule)
Mode complètement automatisé	Modèle de la charge de travail de l'automobiliste et des exigences de la tâche	Accord vis-à-vis des critères d'affectation dynamique de fonction	Système anticollision latéral adaptatif

Note : l'exemple utilisé est une assistance aux sorties de voie du point de vue de la machine.

De l'optimisation des niveaux de l'automatisation

Déterminer des niveaux d'automatisation permet d'optimiser le contrôle entre un opérateur humain et un ordinateur, ou une machine, pour qu'ils soient tous deux impliqués dans la réalisation des actions du système. L'objectif est de concilier les compétences et capacités des deux partis pour créer une synergie car, bien que nous parlions ici d'un système homme-machine, nous concevons cette relation comme un ensemble cohérent plutôt que comme une addition d'entités désordonnées. Le concept de symbiose entre humain et technologie, appelé néo-symbiose, met en lumière le lien de cette relation : Humains et Technologie sont sujets à de forts rapports de dépendance mutuelle (Brangier, Dufresne, & Hammes-Adelé, 2010). Cette symbiose, dans la perspective de l'ergonomie informatique, a

permis de formaliser des critères ergonomiques d'intelligence de l'interaction qui peuvent servir à la conception ou l'évaluation de technologies, et ce dans une volonté d'acceptabilité de celles-ci. On considère qu'il y a coévolution entre l'humain et la technologie, ce qui a amené à reprendre le terme de symbiose propre à la biologie (Bender, De Haan, & Bennett, 1995 ; Brangier, 2002, 2003 ; Griffith, 2006 ; De Rosnay, 2000). Cette approche nous paraît cohérente avec notre recherche dont le champ d'investigation est la nouvelle génération de véhicules automatisés. Un exemple de l'efficacité de la complémentarité d'un système homme-machine a été mis en évidence dans le cadre de la théorie de la détection du signal. Sorkin et Woods (1985) ont montré que le système homme-machine était plus performant pour détecter des signaux que ne l'était la machine ou l'homme séparément.

Il semblerait que l'efficacité d'un système homme-machine repose sur l'équilibre à trouver entre les tâches à déléguer au système et les tâches à laisser à l'opérateur pour que celui-ci reste un acteur conscient du processus de coopération. Bainbridge (1983) parle *d'ironie de l'automatisation*, et rappelle que, bien que les designers reprochent aux opérateurs d'être inefficaces et peu fiables, ce sont bien les erreurs de conception de ces premiers qui sont la cause principale des problèmes rencontrés. Van Elslande (2003) ajoute que, lorsque l'on doit expliquer la cause des accidents de la route, la principale raison avancée est l'erreur humaine. Pourtant, dans la majorité des accidents, différents types de facteurs humains (fatigue), techniques (performance d'un capteur) et contextuels (conditions météorologiques, norme sociale), agissent en interaction les uns avec les autres pour provoquer un dysfonctionnement. L'auteur explique que le facteur humain n'est pas le maillon faible du système usager-véhicule environnement, mais un chaînon fort puisque les individus sont capables de s'adapter à des environnements complexes et incertains. Par exemple, un individu dans un véhicule automatisé pourrait être capable d'assurer des tâches qu'on ne sait pas

automatiser, comme contrôler l'activité s'il en est besoin, établir un diagnostic et effectuer des reprises de contrôle manuelles.

2. Activité de conduite manuelle et automatisée

2.1. Modèles cognitifs de la conduite manuelle

Qu'est-ce que la conduite automobile ?

La conduite automobile est une activité au cours de laquelle l'opérateur surveille et guide l'évolution d'un processus dynamique, c'est-à-dire évoluant de lui-même avec ou sans l'action de l'opérateur (Amalberti, 1996). Elle est considérée comme une tâche principalement visuelle (Kramer & Rohr, 1982 ; Sivak, 1996 ; Spence & Ho, 2009). Elle se déroule dans un environnement dynamique se transformant même lorsque l'opérateur n'agit pas sur lui (Hoc, 1996). Amalberti et Hoc (1994) ont construit un modèle, l'architecture Gestion des Situations Dynamiques (GSD), qui décrit l'activité de l'opérateur. Cette activité est composée de différents niveaux de contrôle :

- la boucle de contrôle rapprochée du processus qui favorise la maîtrise à court terme du véhicule ;
- la boucle de régulation à moyen terme qui utilise la représentation occurrente de la situation ;
- la boucle de régulation à long terme qui fait appel à des connaissances plus générales.

La conduite peut être divisée en trois tâches différentes (Stanton, Young, Walker, Turner, & Randle, 2001) : la navigation, le contrôle et l'évitement des dangers (Tableau 4). On entend par danger un événement routier fortuit, comme la détection subite d'un objet sur la route ou une situation d'urgence non prévisible. Les dangers dynamiques (objet incongru sur la route, piétons, cyclistes) se distinguent des dangers fixes (virages, infrastructures de la route), et sociétaux (signalisation routière). Le contrôle est quant à lui constitué de la maîtrise

latérale (position du véhicule sur la voie) et longitudinale (vitesse du véhicule et inter-distances entre véhicules). Enfin, la navigation comprend la planification générale (déterminer l'itinéraire d'un voyage) et la planification locale (décider de la sortie à prendre avant de s'engager dans un rond-point).

La conduite est une activité très complexe, qui comprendrait plus de 1600 tâches réparties sur cinq niveaux de comportement (Walker, Stanton, & Young, 2001). Concrètement, les automobilistes régulent leur vitesse et leur trajectoire, contrôlent le véhicule, évitent les dangers, prennent des décisions stratégiques quant à l'itinéraire et évaluent leur progression par rapport à leur objectif. Ils réalisent nombre de ces tâches simultanément. En outre, le fait de vouloir réaliser en même temps différents objectifs peut entraîner une situation de conflit (Groeger, 2000). Les automobilistes ménagent ces conflits d'intérêts et ajustent leur conduite en conséquence.

2.2. Les aides à la conduite

Les caractéristiques de la voiture automatisée

Une voiture automatisée est un véhicule dont la conduite est assurée partiellement ou totalement par un système informatique. Le conducteur peut être assisté voire remplacé pour une ou plusieurs fonctions de la conduite, par ce qu'on appelle des aides à la conduite (Tableau 4).

Tableau 4 : Taxonomie des tâches de conduite, d'après Stanton *et al.* (2001).

Sous-tâche :	Assistance		Remplacement	
Technologie :	Conventionnelle	Avancée	Conventionnel	avancé
Navigation	cartes	planificateurs de voyage	passager	GPS et aides à la navigation
Contrôle	direction assistée	aide au stationnement	boîte de transmission automatique	régulateur de vitesse et de position
Identification du danger	autres conducteurs	avertisseurs de collision	passager	système d'évitement des collisions

Voici, de nos jours, les différents composants de la conduite qui peuvent être pris en charge de manière autonome par le véhicule (Tableau 5). Ces dispositifs sont pour certains toujours en évolution.

Tableau 5 : Les différents types d'aides à la conduite

Nom de l'aide à la conduite	Description
La détection de voie	Ce système vise à prévenir l'automobiliste lorsque son véhicule franchit les lignes de démarcation sans utiliser les clignotants. Une version plus évoluée prend des mesures pour remettre le véhicule dans la trajectoire entre les lignes de démarcation si l'automobiliste n'a pas de lui-même rétabli la trajectoire après l'avertissement du système.
La prise en charge de la trajectoire	Avec cette fonctionnalité, le conducteur n'a pas besoin de maintenir le volant pour que le véhicule suive le tracé des voies sur la route.
La régulation de la vitesse	Ce dispositif permet de maintenir une vitesse désirée ou de ne pas dépasser un seuil défini.
La gestion des inter-distances	Cette fonction mesure la distance avec le premier véhicule de devant afin de respecter l'inter-distance entre véhicules. Il adapte la vitesse de la voiture en fonction de cet écart, sans que l'automobiliste ait besoin d'appuyer sur l'accélérateur ou de freiner. C'est le régulateur de vitesse adaptatif (Adaptive Cruise Control [ACC]). Toutefois, sa capacité de freinage ne peut arrêter le véhicule sans l'intervention du conducteur.
La boîte de vitesse automatique	La seule utilisation de la pédale d'accélération, en fonction de la pression exercée dessus, permet de passer les vitesses.
La détection des collisions	Grâce à une technologie laser (Light Detection And Ranging, LIDAR), le véhicule est doté d'une vision propre permettant de détecter les objets tout autour du véhicule.
La détection de sorties de route	Ce dispositif prévient l'automobiliste lorsque le véhicule franchit une ligne de démarcation de voie. Un signal sonore ou haptique peut être envoyé et, pour certains modèles, le système rectifie légèrement la trajectoire automatiquement pour que le véhicule se réinsère dans sa voie et cesse de dévier.
La détection des piétons	Ce système a été intégré sur des véhicules commercialisables, et notamment par Volvo sur le modèle S60. Il permet la reconnaissance frontale de piétons en milieu urbain, et a la faculté de freiner automatiquement en cas de détection jusqu'à la vitesse de 30 km/h.
L'assistance au freinage automatique	Plus communément appelé ABS, il vise à établir un freinage fort sans que les roues ne se bloquent. La distance de freinage est réduite par rapport à des freins classiques, et ce en réglant de manière automatique le niveau de pression hydraulique. Le fait que les roues ne soient pas bloquées facilite pour le conducteur le contrôle de la trajectoire lors de freinages importants.
Le freinage automatique	Cela permet de gérer un ralentissement modéré, par exemple lors de la gestion des inter-distances avec le véhicule de devant, mais aussi de prendre en charge une partie d'un freinage d'urgence.
Le freinage automatique en cas de dérapage	L'Electronic Stability Control (ESC) est un correcteur électronique de trajectoire qui s'active lorsque le véhicule est en sous-virage ou en survirage. Ce dispositif permet de ne pas déraper et de garder le contrôle de la trajectoire en activant le freinage d'une ou plusieurs roues du véhicule de manière automatique. Depuis le 1 ^{er} janvier 2012, cet équipement est obligatoire en France.
Le frein de stationnement électrique	A chaque arrêt du véhicule, aussi bref soit-il, ce frein s'active et évite au conducteur de garder son pied sur la pédale de frein.
La détection de l'état physique du conducteur	Driver Status Monitoring System (DSMS). Ce dispositif utilise des techniques de traitement de l'image ainsi que l'inertie du véhicule pour détecter la conduite en état d'ébriété, la fatigue et la distraction. Les caractéristiques faciales de l'automobiliste, comme le clignement des yeux ou le balancement de la tête, sont analysées pour évaluer le niveau de distraction et/ou de fatigue. Il en est de même pour l'inertie du véhicule : si le système détecte des trajectoires anormales (en « S ») survenant de manière régulière, il en prévient le conducteur via des stimuli sonores et/ou visuels.
La gestion de l'itinéraire du trajet	Le Global Positioning System (GPS) est un système de localisation par satellite qui fonctionne sur toute la planète. Il permet de localiser l'endroit où se trouve le véhicule et de trouver un itinéraire jusqu'à une destination définie.

Système d'amélioration de la vision	Ce dispositif a pour but d'améliorer la visibilité de la route et de l'environnement lorsque la conduite se fait de nuit, ou que les conditions météorologiques sont dégradées (poussière, éblouissement, brouillard etc.).
--	---

2.3. Bénéfices et limites de la conduite automatisée

Une amélioration globale de la conduite

L'automatisation partielle de la conduite, notamment possible grâce à une aide telle que le régulateur de vitesse, améliore la qualité de la conduite à condition que l'automobiliste prenne en charge le contrôle latéral du véhicule (Funke, Matthews, Warm, & Emo, 2007). Cette aide permet également de faciliter et de rendre plus confortable les trajets en voiture (Richardson, Barber, King, Hoare, & Cooper, 1997). La conduite complètement automatisée a le même genre de bénéfices sur la conduite mais permet aussi d'améliorer d'autres critères.

Afin de mettre en valeur les aspects positifs de l'automatisation complète des véhicules, trois arguments ont été proposés par Stanton et Marsden (1996). Le premier consiste à dire que la conduite est une activité anxiogène qui pourrait être plus agréable pour l'automobiliste si certaines tâches de la conduite étaient prises en charge par un système automatisé. Une étude révèle qu'entre 5% et 10% des accidents sur autoroutes au Royaume-Uni pourraient être évités grâce à l'automatisation de la conduite, notamment parce que les conducteurs conduisent trop vite et sont facilement distraits (Broughton & Markey, 1996). Le deuxième argument s'appuie sur le fait que l'erreur humaine constitue une cause majeure des accidents de la route, bien que cet argument puisse être remis en question par certains auteurs (Van Elslande, 2003). Ainsi, si l'humain est retiré de la boucle de contrôle, c'est-à-dire désengagé de l'activité de conduite, et qu'on le remplace par un système automatisé, cela pourrait entraîner une baisse significative des accidents. Enfin, le dernier argument est d'ordre économique. Il consiste à dire que les véhicules automatisés pourront participer à la relance du marché automobile de par leur nouveauté, leur technologie et les services proposés.

Vers une automatisation plus efficace

A contrario, trois écueils majeurs sont attribués à l'automatisation de la conduite (Stanton *et al.*, 1996 ; Stanton & Young, 1998). Le premier est que les automobilistes risquent de devenir trop confiants vis-à-vis des systèmes automatisés, ce qui correspond au phénomène de contentement, c'est-à-dire que les utilisateurs ne remettent pas en cause les capacités du système qu'ils utilisent. Le deuxième est que les automobilistes pourront faire appel à ces dispositifs dans des situations de conduite inadaptées qu'ils ne sauraient gérer sans la conduite automatisée, par exemple conduire en état d'ébriété. Le troisième est que les automobilistes pourront échouer à estimer si le système se comporte de manière contraire à leurs attentes.

Indépendamment du domaine automobile, Bainbridge (1983) prévient des limites de l'efficacité d'un système automatisé lorsque l'on confie à l'opérateur humain ce que ne peut pas faire la machine. Elle parle dans ce cas d'une stratégie de design défectueuse. Elle insiste sur le fait qu'il n'est pas judicieux de placer un individu à une tâche de surveillance dans un système automatisé, car ce n'est pas la tâche pour laquelle l'homme est le plus performant. Par ailleurs, Reason (1990) avance qu'en situation de crise l'automatisation devrait être utile alors que c'est dans ce type de situation qu'elle l'est le moins. Il fait référence au *catch-22*, une situation perdant-perdant, et évoque le fait que l'humain n'est présent dans un système automatisé que pour gérer les états d'urgence. Et Norman (1990) de dire que l'on ne devrait pas automatiser tant que le système n'est pas en mesure d'agir de manière autonome dans toutes les situations. La problématique de la situation de crise dans un système automatisé est illustrée par Stanton *et al.* (2001). Les chercheurs se posent la question de la capacité des automobilistes à reprendre le contrôle dans une situation de freinage d'urgence. Leurs résultats montrent que lorsque les automobilistes utilisent l'ACC, ils sont moins capables

d'intervenir de manière appropriée, et s'exposent ainsi davantage à des situations d'accidents par rapport à la conduite manuelle.

Du point de vue de la sécurité, prendre de courtes pauses sur de longs trajets permet aux automobilistes de se reposer dans une moindre mesure (Tucker, 2003 ; Caldwell, Mallis, Caldwell, Paul, Miller, & Neri, 2009). La possibilité donnée aux conducteurs de déléguer certaines voire toutes les tâches de la conduite irait également en ce sens en leur offrant la possibilité de se reposer. Néanmoins, il convient de prendre en considération que le fait de délibérer pour savoir quand utiliser un système automatisé peut potentiellement augmenter la charge de travail de l'opérateur (Parasuraman *et al.*, 1997).

Qu'en est-il de l'automatisation totale ? La place de l'opérateur humain dans un dispositif entièrement automatisé.

L'automatisation totale d'un système correspond à la réalisation d'une tâche de manière autonome par des dispositifs mécaniques et/ou informatiques, sans l'intervention manuelle d'un humain. L'opérateur ne manipule pas le système en cours de fonctionnement, en revanche, il peut le superviser ou le contrôler. Ces deux notions sont différentes et impliquent un rôle différent de l'opérateur.

La supervision d'un système automatisé par un humain n'implique pas que celui-ci agisse directement sur le processus en cours (Moray, 1986). Il observe les actions de l'ordinateur et les approuve ou les réproouve. Lorsque le système fonctionne de manière opérationnelle, le superviseur contrôle les affichages du système et reste vigilant vis-à-vis des signaux indiquant qu'une intervention pourrait être nécessaire afin d'éviter une erreur ou un dysfonctionnement du système. L'opérateur est ici dans une posture préventive. En cas d'erreur, l'opérateur doit directement contrôler le processus afin de rectifier l'échec de l'automatisation, et par la suite revenir à son activité de supervision. Les performances

humaines lors de la supervision sont faibles car la charge de travail de l'opérateur dans des conditions de fonctionnement normales est réduite, ce qui entraîne la perte du fil de l'activité et une dégradation des compétences de contrôle, compétences qui sont primordiales afin de rétablir le système suite à erreur (Kaber *et al.*, 1997).

L'activité de contrôle consiste à attendre pour détecter un évènement critique du processus automatisé. Cela implique que l'opérateur visualise et analyse les affichages donnant des informations sur l'état du processus sans pour autant intervenir, hormis en cas de nécessité (Moray, 1986). L'opérateur est ici dans une posture de réaction. Son but est de déterminer si le processus fonctionne normalement ou s'il est nécessaire d'intervenir. Lorsque l'automatisation est opérationnelle, le contrôleur doit faire des échantillons des indicateurs du statut du processus, et évaluer le besoin d'une éventuelle intervention pendant que le système automatisé prend en charge des fonctions qui étaient autrefois assurées par l'humain (Wickens, 1992). Lorsqu'il détecte une erreur, le contrôleur doit faire la même chose que le superviseur, à savoir agir directement sur le système pour le rétablir. Les différences entre ces deux activités sont, contrairement au contrôle, que la supervision implique :

- Le choix de mesures appropriées pour résoudre les erreurs et échecs du système ;
- Exécuter ces plans pour orienter le système vers de nouveaux objectifs ;
- Exercer ponctuellement un contrôle manuel sur le système informatisé.

L'automatisation est vraisemblablement un terme qui peut être ambigu en ce sens que le système a toujours besoin de surveillance ou de maintenance. Dans l'un ou l'autre des cas, l'opérateur a un rôle à jouer et contribue au bon fonctionnement de l'automatisation, bien qu'il ne soit plus au cœur de la réalisation de la tâche. Cette relation confirme l'idée de néo-symbiose (Brangier *et al.*, 2009), dans laquelle homme et machine sont sujets à des relations de fortes dépendances mutuelles : l'un réalise la tâche, l'autre encadre l'activité en s'assurant de son bon déroulement. Cependant, la place de l'opérateur en tant que garde-fou du système

automatisé présente des contreparties. La position de surveillant, ou contrôleur, peut suggérer que l'opérateur soit dans un rôle relativement oisif et confortable, favorisant un certain niveau de performance tout au long de son activité. Pourtant, les situations de supervision et de contrôle peuvent produire des charges de travail cognitives aussi bien importantes que faibles, occasionnant le même résultat : de faibles performances du système homme-machine.

La technologie n'est pas infaillible

L'informatique possède une vitesse de calcul que n'a pas l'homme, et permet au système de conduite automatisée de réagir plus rapidement que l'automobiliste. Toutefois, l'informatique ne peut anticiper comme pourrait le faire un être humain. L'anticipation peut être le fruit de l'expérience. L'anticipation se ferait en analysant les comportements des autres véhicules en interaction, et permet de préparer l'automobiliste à appréhender des situations de conduite pour lesquelles il puisse s'adapter au besoin. Il ne paraît pas saugrenu de faire l'analogie entre la capacité d'adaptation d'un humain et la résilience d'un système.

Un autre inconvénient des systèmes de conduite automatisée est lié aux dispositifs utilisés. En effet, le LIDAR, qui est un système de laser, envoie un signal qui lui est retransmis, mais ne peut détecter que le(s) premier(s) objet(s) autour de lui dans un rayon de 360°. Les objets situés « dans l'ombre » d'autres objets peuvent ne pas être détectés. Par exemple, sur autoroute, un automobiliste peut voir que devant lui la circulation ralentit et peut anticiper le ralentissement dans sa file. Il peut également voir avant de dépasser un véhicule qu'il y en a encore un autre devant, et peut se préparer à choisir le moment opportun pour doubler deux voitures et non pas une. L'automatisation n'est pas encore à même de prévoir toutes ces situations, bien qu'elle puisse réagir plus rapidement qu'un être humain, et donc de miser sur ses meilleurs temps de réponse pour gérer ce type d'interactions. Ensuite, se pose le problème des sommets de côtes qui peuvent laisser de fausses indications au système quant à

la présence d'objets devant le véhicule. La mauvaise qualité du marquage au sol ou la possibilité qu'il soit masqué par la neige ou des feuilles pose problème aux systèmes de détection de voies. La transgression parfois nécessaire des règles de conduite est un point délicat à traiter pour un ordinateur. En effet, une situation simple pour un humain peut être difficile voire insolvable pour un ordinateur. Par exemple, si pour dépasser un cycliste il est nécessaire de franchir une ligne continue, l'ordinateur va devoir transgresser le code de la route pour réaliser un dépassement, ce qui peut créer des conflits dans la logique de fonctionnement du système. L'humain n'a pas une telle difficulté à prendre une de décision dans ce genre de situation. Enfin, la détection d'agents de circulation est problématique : seront-ils considérés comme des piétons ? Le système comprendra-t-il les gestes réalisés par les agents ? Sera-t-il possible d'identifier les agents comme des modérateurs de la circulation et non comme des piétons ?

Concernant les véhicules CityMobil, en particulier les *podcars* (véhicules à roues sans commandes) de La Rochelle, Parent (2012) précise qu'ils peuvent circuler de manière très efficace dans la ville, à partir du moment où ils ne roulent pas dans le trafic principal. Il ajoute qu'il ne pense pas que ces véhicules puissent circuler dans des situations de trafic important car on ne peut pas prédire tout ce qu'un automobiliste (et les autres usagers) peuvent faire.

2.4. Nomenclatures : NHTSA & SAE

Ces deux nomenclatures sont utilisées par l'industrie automobile pour décrire la voiture automatisée, en partant d'une conduite manuelle pour aller à une conduite complètement automatisée. La grille de lecture SAE est semblable à une autre grille développée par l'Institut Fédéral de Recherche sur Autoroute Allemand (BAST) (Tableau 6). Elles comportent 5 niveaux d'automatisation chacune (de 0 à 4). Ces deux grilles sont elles-mêmes similaires à celle développée par la NHTSA qui décrit 6 niveaux d'automatisation. Pour ces nomenclatures, la conduite est considérée comme hautement automatisée à partir du niveau 3, sachant que le niveau 0 correspond à une automatisation nulle. Le niveau 3 requiert que l'automobiliste supervise le système, ce qui n'est plus le cas au niveau 4. Le 5, spécifique à la NHTSA, renvoie à la capacité du véhicule à se mettre en situation de sécurité dans n'importe quelle situation (panne ou dysfonctionnement du système) et rouler en mode complètement automatisé en toute situation. Ce niveau décrit un véhicule automatisé avec une résilience très élevée. Les véhicules les plus automatisés accessibles aujourd'hui appartiendraient au niveau 2, car ils combinent différents types d'ADAS pour automatiser la conduite (régulateur de vitesse couplé à un contrôleur de trajectoire).

Tableau 6 : Nomenclature BAST et SAE de la conduite automatisée

Level	Name	Narrative definition	Execution of steering and acceleration/ deceleration	Monitoring of driving environment	Fallback performance of dynamic driving task	System capability (driving modes)	BAST level	NHTSA level
Human driver monitors the driving environment								
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a	Driver only	0
1	Driver Assistance	the <i>driving mode</i> -specific execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes	Assisted	1
2	Partial Automation	the <i>driving mode</i> -specific execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the <i>dynamic driving task</i>	System	Human driver	Human driver	Some driving modes	Partially automated	2
Automated driving system ("system") monitors the driving environment								
3	Conditional Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	Human driver	Some driving modes	Highly automated	3
4	High Automation	the <i>driving mode</i> -specific performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> , even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a <i>request to intervene</i>	System	System	System	Some driving modes	Fully automated	3/4
5	Full Automation	the full-time performance by an <i>automated driving system</i> of all aspects of the <i>dynamic driving task</i> under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	All driving modes		

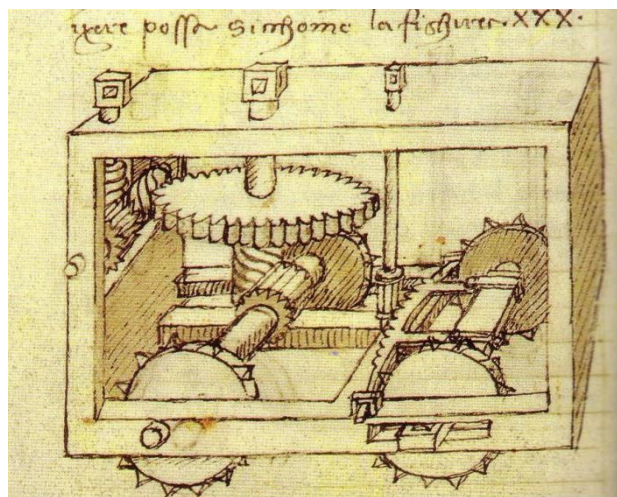
La section suivante consiste à décrire comment, à travers les âges, les véhicules se sont peu à peu automatisés, jusqu'à atteindre un stade où certains modèles hautement automatisés (niveau 3) peuvent rouler sur des circuits voir certains tronçons de routes publiques dans un cadre expérimental.

3. Evolution de la conduite automatisée : premiers concepts et défis majeurs

3.1. Genèse de l'automatisation des véhicules

En 1788, probablement inspiré par les carnets d'ingénieur de Francesco di Giorgio Martini datant du XV^{ème} siècle, comprenant entre autres des croquis de véhicules automobiles (Figure 2), James Watt déposa un brevet pour son régulateur à boules. Ce système avait pour fonction de réguler la vitesse rotative d'une machine à vapeur par un phénomène de rétroaction automatique.

Figure 2 : Extrait du carnet d'ingénieur de Francesco di Giorgio Martini, 1470.



Le premier système d'automatisation partielle de la conduite remonte à 1945, année durant laquelle l'ingénieur en mécanique Ralph Teetor breveta le dispositif *Speedostat*, que nous connaissons aujourd'hui sous le nom de régulateur de vitesse ou encore *cruise control*. La commercialisation de ce dispositif se fera en 1958 sous le nom *d'Auto-Pilot* sur les modèles *Imperial*, *Windsor* et *Chrysler New Yorker* du constructeur *Chrysler*. C'est en 1977 que sera conçu le premier véhicule automatisé avec une forme d'intelligence, par le Laboratoire d'Ingénierie Mécanique de Tsukuba au Japon. Ce dernier peut rouler sur piste sans intervention humaine jusqu'à une vitesse de 30 km/h en suivant les lignes blanches de marquage au sol (Figure 3).

Figure 3: Habitacle du premier véhicule automatisé capable de conduire à basse vitesse sans intervention humaine, Laboratoire d'Ingénierie Mécanique, Tsukuba, Japon.



Les parties suivantes vont décrire, en suivant un ordre chronologique et par thème, des projets internationaux de développement et conception de véhicules automatisés à différents degrés. Toutefois, certains projets étant confidentiels, car mis en place dans le domaine privé, il est difficile de faire une liste exhaustive.

3.2. Premiers modèles issus de la recherche

3.2.1. *Eureka Prometheus project*

Eureka Prometheus (PROgramMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety) est un vaste projet de recherche et développement qui a existé de 1987 à 1995. Son thème de recherche était la voiture automatisée sans chauffeur. Il avait défini l'état de l'art de l'époque sur les véhicules automatisés. C'était un programme financé par la Commission Européenne.

L'illustration la plus éloquente du projet renvoie à la collaboration entre Ernst Dickmanns de la Bundeswehr Universität München et Daimler-Benz. Ils parvinrent en 1994 à construire deux véhicules, VaMP et VITA-2, qui furent capables de conduire sans chauffeur près d'un millier de kilomètres sur l'A1 dans les environs de l'aéroport Charles de Gaulle, avec un trafic important. Les véhicules atteignirent jusqu'à 130 km/h, purent rouler en convoi, suivre d'autres véhicules et changer de voie avec la possibilité de dépasser d'autres véhicules.

Le point d'orgue fut atteint en 1995, lorsque la même équipe développa, sur la base d'une Mercedes Classe S, un véhicule qui parvint à réaliser un voyage Munich-Copenhague aller-retour, et ce sans chauffeur. Un opérateur devait réaliser des interventions tous les 9 km, avec toutefois une distance parcourue de 158 km de manière complètement autonome. Sur certaines portions d'autoroutes allemandes, le véhicule atteignit la vitesse de 175 km/h. Au final, 95% de la distance fut parcourue de manière autonome par le système en charge de la conduite.

3.2.2. ARGO project, 1996-

Le projet ARGO était une entité du projet EUREKA Prometheus et avait été créé à l'Università degli studi di Parma. Le principal développement de ce projet fut le système Generic Obstacle and Lane Detection (GOLD). C'était un système de conduite automatique intégré à une Lancia Thema 2000, lui permettant de conduire le véhicule de manière autonome dans des conditions réelles de trafic, que ce soit sur des routes ou des autoroutes. Il n'y eut pas besoin de changer l'infrastructure de la route pour que le système fonctionne, ce dernier détectant le marquage au sol. En 1998, la Lancia Thema 2000 équipée du système GOLD fit le trajet de la course Mille Miglia, allant de Brescia à Milan pour une distance d'environ 1600 km, de manière autonome.

3.3. Les défis des années 2000

A partir des années 2000, des projets plus ambitieux ont été développés pour faire rouler des véhicules hautement automatisés dans des conditions difficiles et sur des longues distances.

3.3.1. *DARPA, 2004-2007*

D'origine militaire, le Grand Challenge Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) était une compétition de véhicules sans chauffeur qui avait eu lieu au cours de trois éditions, en 2004, 2005 et 2007. Ce challenge avait pour objectif de mettre au service de l'armée les découvertes fondamentales concernant des véhicules terrestres totalement automatisés capables de parcourir un maximum de distance en hors-piste, en l'occurrence dans le désert du Nevada. Le Challenge évolua et s'intéressa à la conduite de véhicules automatisés dans des milieux urbains (DARPA Urban Challenge, 2007). Ce défi consistait à parcourir 96 km en zone urbaine en moins de six heures. Tous les véhicules étaient lancés en même temps, et les systèmes devaient donc pouvoir gérer les collisions et les obstacles sur leur trajectoire. Les systèmes informatiques prenaient des décisions en temps réel, notamment dans des intersections à quatre voies. Six des 53 équipes engagées dans le challenge finirent la course, dont trois en dessous du temps imparti de six heures.

3.3.2. *VisLab Intercontinental Autonomous Challenge, 2010*

Le VisLab Intercontinental Autonomous Challenge (VIAC), était un défi pour véhicules automatisés dans des conditions extrêmes. Il avait eu lieu de juillet à fin octobre 2010, pour un voyage de quatre véhicules sans automobilistes de près de 15 000 km, au départ de Parme en Italie et à destination de Shanghai en Chine. L'objectif est que l'humain n'intervienne pas sur les véhicules lors la réalisation de ce trajet.

Le but de ce voyage était de montrer qu'il était possible de faire transiter des ressources sur de longues distances, entre continents, de manière écologique et sans

intervention humaine, et ce dans des conditions de trafic réelles. L'intérêt était de tester et d'éprouver les technologies élaborées afin de recueillir une grande quantité d'informations sur un large panel de situations, afin de les réutiliser pour affiner les systèmes de conduite automatisée.

Le premier véhicule, sujet à des interventions humaines en cas de situations critiques ainsi que pour la planification du trajet, avait servi d'éclaireur aux suivants, et leur avait envoyé des informations pour qu'ils puissent prendre des itinéraires différents en cas de difficultés. Les véhicules suivant l'éclaireur avaient ainsi pu parcourir le trajet de manière autonome à l'aide des informations collectées puis transmises par leur homologue. L'accent avait été mis sur la communication entre véhicules pour favoriser leur autonomie.

3.3.3. *ARCOS, 2002-2005*

Le projet français Action de Recherche pour une Conduite Sécurisée (ARCOS) a fait collaborer entre 2002 et 2005 des instituts privés et publics pour la recherche sur les systèmes et infrastructures véhicule-automobiliste. L'objectif était de maîtriser les dispositifs permettant de réguler les distances inter-véhicules, d'éviter les collisions avec des objets mobiles ou non, d'empêcher les véhicules de dériver de leur voie, et enfin d'alerter les véhicules en amont du trafic des accidents qu'ils pouvaient rencontrer. Les axes de recherche portaient essentiellement sur la sécurité des transports routiers. Des dispositifs de détection d'obstacles et de mouvements latéraux, d'estimation d'adhérence et de communication inter-véhicules ont pu être développés. Ces recherches ont été menées en prenant en considération l'acceptabilité de tels dispositifs par les automobilistes.

3.4. L'automatisation des véhicules commercialisés

3.4.1. *Les véhicules pour particuliers*

De nombreux constructeurs ont testé depuis les années 2000 des systèmes de conduite automatisée de véhicule, qui prennent en charge plusieurs fonctionnalités de conduite normalement attribuées à un humain : Volkswagen, Volvo, Audi, Cadillac, Ford, General Motors, Mercedes-Benz, Tesla, Renault, PSA, Toyota, Nissan. Les constructeurs ne font pas tous part de leurs avancées dans le domaine pour se préserver de la concurrence, c'est pourquoi cette liste n'est probablement pas exhaustive. D'autres acteurs participent à l'automatisation de la conduite sans pour autant construire des véhicules, par exemple *Google* ou *Cruise*. Le but est de commercialiser ces voitures et les rendre accessibles à l'ensemble des automobilistes.

Voici donc certains des projets de véhicules automatisés visant le grand public (Tableau 7) :

Tableau 7 : Principaux projets de véhicules automatisés pour le grand public

Période	Description
Depuis 2005	BMW teste des voitures sans automobiliste, avec le modèle Track Trainer 330i qui a fait des essais publics en 2007 et 2011.
2010	Audi a fait rouler son modèle TTS sans automobiliste sur le circuit de Pikes Peak International Hill Climb en Californie, pour terminer la course en près de 27 minutes.
2011	Volvo, partenaire du projet européen SARTRE (Safe Road Trains for the Environment), a développé un système de voiture automatisé en convoi sur autoroute, pouvant aller jusqu'à 90km/h.
2011	A l'été 2011, Volkswagen a fait une démonstration de son système TAP <i>Temporary Auto Pilot</i> qui prend en charge de manière informatique la conduite d'un véhicule, jusqu'à 130km/h, en gérant le tracé des voies et les collisions. Toutefois, l'automobiliste doit rester vigilant et être prêt à reprendre le contrôle manuellement en cas d'urgence.
2013	La Classe S de Mercedes, intègre des dispositifs de freinage intelligent qui agissent si l'automobiliste ne réagit pas en présence d'un risque de collision. Le véhicule dispose d'un régulateur de vitesse et de distance fonctionnant de 0 à 200km/h. Il aide l'automobiliste à garder le véhicule à la distance désirée (mesurée en temps) par rapport au véhicule précédent. Ce dispositif utilise des capteurs radar mesurant de manière continue la distance, puis un calculateur analyse ces données pour réguler la vitesse et permet de déclencher des interventions de freinage si besoin. Concernant le freinage en situation critique, un dispositif de freinage d'urgence assisté peut contribuer à réduire la distance de freinage en permettant à l'automobiliste d'exercer une pression de freinage supplémentaire adaptée à la situation dès que celui-ci freine. Si un risque de collision est détecté et que l'automobiliste n'utilise pas le frein à temps, des signaux visuels et sonores l'en avertissent. S'il ne réagit pas aux stimuli, le système actionne un freinage partiel 1,6s avant que l'impact détecté n'ait lieu. Si le système considère la situation comme très critique et que l'automobiliste ne réagit absolument pas, le système est en mesure de déclencher de manière autonome un freinage au maximum de ses capacités 0,6s avant l'inévitable collision détectée.
2013	Toyota a annoncé la commercialisation de voitures équipées d'un système de <i>conduite automatique</i> qui serait capable de tenir la bonne trajectoire et de respecter les distances de sécurité inter-véhicules.
2016	En 2012, Audi a annoncé l'implémentation de son système de conduite automatisée à basse vitesse, le Traffic Jam Assistant, sur son modèle A8. Le système fonctionne jusqu'à la vitesse de 37mph (60km/h), bien qu'il ne soit pas recommandé de l'utiliser sur des tracés de route complexes. Ce modèle devrait être commercialisé vers 2016.
2017	En 2012, Cadillac a dévoilé son système de régulation de vitesse amélioré, baptisé <i>Super Cruise</i> . Il ne fonctionnera que sur autoroute et vise à réduire la charge de travail de l'automobiliste qui n'aura ni à toucher le volant, ni à gérer les pédales.
2017	Ford travaille sur des systèmes de conduite automatisée. Au Mobile World Congress de 2012 à Barcelone, le constructeur a annoncé que leurs voitures semi-automatisées seraient sur la route en 2017. A partir de 2025, ont été annoncées les voitures totalement automatisées. Le constructeur a estimé que le parc automobile, actuellement de un milliard, sera de quatre milliards à l'horizon 2050.
Vers 2018	La marque Chevrolet de General Motors teste des véhicules sans automobilistes, notamment à Shanghai avec son modèle écologique En-V (Electric Networked Vehicle).

3.4.2. ADASE II 2001-2004

C'est un projet soutenu par l'Europe regroupant plusieurs constructeurs (BMW, Fiat, Peugeot Citroën & Jaguar Land Rover). Le sigle vient d'ADAS (Advanced Driver Assistance Systems). Ce projet entend mettre en relation les différents acteurs de l'industrie et de la recherche afin de donner des lignes directrices pour les collaborations et travaux à l'international sur les aides à la conduite et les transports. Ce projet vise à partager et mutualiser les connaissances, tant dans le domaine privé que le domaine public.

3.4.3. Le consortium HAVEit, fini en 2011

Lancé en février 2008, HAVEit (Highly Automated Vehicles for Intelligent Transport) est un projet de l'Union Européenne qui réunit des constructeurs, des universités et des instituts de recherche. Il vise à développer des technologies d'automatisation de véhicules, voitures et camions, afin qu'ils puissent rouler de manière autonome sous le contrôle de l'automobiliste. Les objectifs de l'automatisation de véhicules par ce consortium sont :

- de baisser la charge de travail de l'automobiliste ;
- d'empêcher les accidents ;
- de réduire l'impact des véhicules sur l'environnement ;
- de rendre le trafic routier plus sûr.

Trois modes d'automatisation ont été développés. Dans le premier mode, l'automobiliste conduit mais est assisté par les dispositifs de freinage d'urgence et de maintien dans la voie. En mode semi-automatisé, le véhicule gère le contrôle longitudinal et dispense l'automobiliste d'utiliser l'accélérateur et le frein. Dans le troisième mode dit hautement automatisé, s'ajoute le contrôle latéral que l'automobiliste n'a plus à gérer. Cependant, il est considéré comme entièrement responsable des manœuvres réalisées par le véhicule et doit être prêt à reprendre le contrôle manuel à tout instant. Il doit surveiller ce que fait le véhicule. Ce faisant, une caméra dans le véhicule observe les comportements de l'automobiliste et est à

même de détecter si celui-ci n'est plus vigilant, déclenchant dans ce cas un avertissement pour d'une part qu'il reprenne le contrôle manuel du véhicule, et d'autre part pour le réinsérer dans la boucle de contrôle, selon les termes utilisés par le consortium. Le système *Automatic Queue Assistance to Aid Under-loaded Drivers* dédié à la conduite sur routes congestionnées a également été développé. Il prend le relais de l'automobiliste lorsque la conduite est monotone et qu'elle risque d'entraîner des baisses de vigilance.

3.4.4. *Le projet Automatisation Basse Vitesse, 2010-2013*

C'est un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche et qui met à contribution aussi bien des industriels que des laboratoires de recherche. Comme son nom l'indique, l'objectif est ici d'automatiser complètement des véhicules jusqu'à une vitesse de 50km/h, car la vitesse laisse au système un temps de réaction de 2s en cas de détection de danger. Les systèmes conçus dans ce projet nécessitent une route dite *sécurisée*, à savoir que le marquage au sol et les panneaux de signalisation sont reconnaissables par le système et que la route puisse donner certaines informations au système (une carte locale de l'endroit où se trouve le véhicule). A cette vitesse, le système est en mesure de s'arrêter complètement tout seul et peut se positionner sur la file d'arrêt d'urgence en cas de problème. Au-delà de 50km/h, l'automatisation n'est que longitudinale et le véhicule ne s'arrête que sur la voie dans laquelle il se trouve s'il y a urgence.

3.4.5. *L'action Vehicle and Road Automation, 2013-2016*

VRA est un groupe d'action support fondé par l'Union Européenne pour créer un réseau de collaboration d'experts et d'actionnaires travaillant sur le déploiement de véhicules automatisés et leurs infrastructures. VRA a pour but de :

- maintenir un réseau européen actif d'experts et d'actionnaires en véhicules et routes automatisés
- contribuer à la collaboration Europe-Japon sur ces thèmes

- identifier les besoins de déploiement des différents domaines du véhicule et de la route automatisés
- promouvoir la recherche Européenne sur ces domaines à travers la diffusion d'outils innovants

3.5. L'automatisation de véhicules pour le transport public

3.5.1. *CityMobil 1 & 2, 2004-2011*

C'est un projet européen de recherche et de développement dans le domaine du transport automatisé (Tableau 8). Ses objectifs sont de diminuer la congestion et la pollution dans les villes, d'accroître la sécurité de la conduite, ainsi que d'améliorer la qualité de vie citadine. Il a pu concrétiser sur le long terme plusieurs projets de transports publics automatisés :

Tableau 8: Les projets CityMobil

Nom du projet	Description
Heathrow PRT (Personal Rapid Transit)	Ce sont des navettes électriques, roulant sur rails, et pouvant contenir jusqu'à quatre personnes. Elles relient le terminal 5 de l'aéroport londonien au parking de la classe business.
Rome CTS (Cybernetic Transport System)	Ce sont des petits bus pouvant contenir jusqu'à 20 personnes, pour une autonomie de 2.2 km et une vitesse maximum de 30 km/h. Ils servent à accéder au nouveau centre d'exhibition de Rome qui a été reconstruit à côté de l'aéroport, en périphérie de la ville. Les usagers garent leur voiture dans un parking à 500 m de l'entrée du centre, et peuvent ensuite monter dans un CTS qui les emmène jusqu'à l'accueil du bâtiment. Ils peuvent emprunter le CTS pour le trajet de retour et sont accompagnés jusqu'à l'endroit où ils avaient garé leur véhicule personnel.
Castellón	Ce projet est hybride, car il utilise un système de bus électriques alimentés par des caténaires de tramways. Ce dispositif assure une liaison entre l'université de la ville, son centre-ville, et Benicassim, une ville côtière. Les bus sont partiellement automatisés : un système informatique gère la trajectoire du véhicule qui emprunte des pistes rectilignes qui lui sont dédiées. Ces pistes sont plus étroites que celles allouées habituellement à ce type de véhicule, et prennent donc moins de place tout en évitant des manœuvres nécessitant de larges voies pour être réalisées.
La Rochelle	Pendant 3 mois, la ville a été le terrain d'une démonstration à petite échelle. Des véhicules électriques à quatre places et sans conducteur, appelés cybercars (ou <i>podcars</i>), ont pu circuler au cœur de la ville dans un circuit fermé (Figure 4). Toutefois, ces cybercars ont roulé à côté de piétons, de cyclistes et de quelques voitures. Ils pouvaient s'arrêter à cinq points prédéfinis du trajet. Cette démonstration était ouverte au grand public.
CityMobil 2	Ce projet est en cours de réalisation, et collabore avec différentes université européenne (Leeds, Southampton, Sapienza), institutions et fournisseurs (Vantaa institute, Robosoft advanced robotic solutions, etc.). Une trentaine de villes européennes devraient être partenaires du projet pour faire des expérimentations à grande échelle.

Figure 4 : La cybercar CityMobil utilisée à la Rochelle



3.5.2. 2getthere, 1999-

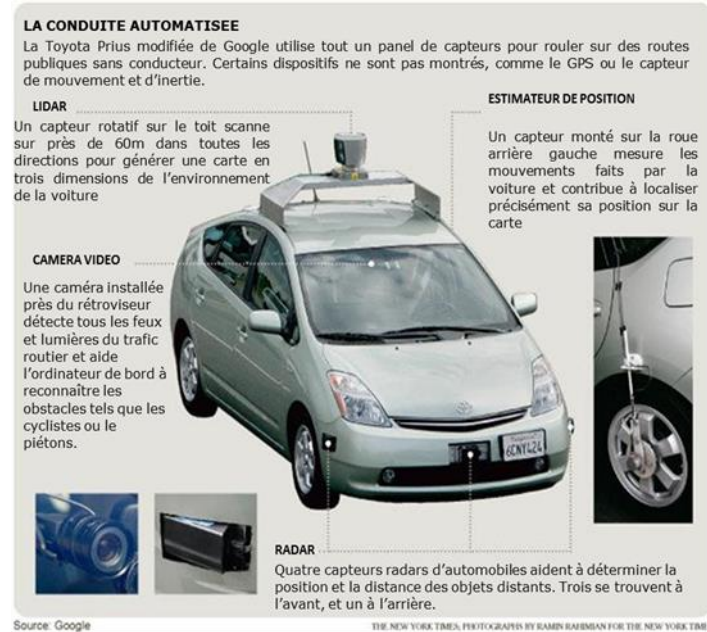
Anciennement appelé FROG (Free-Ranging On Grid) à sa création en 1999, c'est un programme hollandais dont le projet le plus éminent est la mise en circulation de robots taxis, des *Personal Rapid Transit*, appelés également *podcars*, dans Masdar City aux Emirats arabes unis. Cette ville, qui aspire à être écologique en ne rejetant pas de carbone, accueille cette initiative permettant de se déplacer vers l'université de la ville en appelant ces véhicules électriques entièrement automatisés, desservant cinq arrêts. Les six passagers que peut accueillir le *podcar* n'ont qu'à appuyer sur le bouton de leur destination pour que le véhicule se rende de lui-même à la destination désirée. Fin 2012, près de 500 000 personnes avaient utilisé ce type de transport. Des projets similaires ont été développés à Hoofddorp pour des *podcars*, à Capelle aan den IJssel pour des bus reliant Rotterdam ainsi qu'à Amsterdam au sein même des parkings de voitures avec encore une fois des *podcars*.

3.6. La Google self-driving car

La libre circulation de cette voiture automatisée a été permise par l'état du Nevada en 2011 et en Californie en 2012 (Figure 5). Certains ingénieurs du Challenge DARPA sont impliqués dans la conception de l'automatisation de cette voiture. Le véhicule roule sans intervention humaine, que ce soit sur autoroute ou en milieu urbain. Lorsque le véhicule fonctionne, il y a un automobiliste derrière le volant et un ingénieur à ses côtés qui vérifie le bon fonctionnement des processus informatiques. Son autonomie sans intervention est d'environ 1 600km, et jusqu'à 225 000km avec des interventions humaines occasionnelles. Le dispositif technologique permettant de la faire fonctionner inclut entre autre des radars lasers (LIDAR), des caméras vidéo, des détecteurs de mouvements et de lumières, des cartes routières détaillées ainsi qu'un GPS. Les centres de données de Google recoupent les données enregistrées et analysées par le véhicule pour l'aider à rouler de manière autonome, ou plus exactement avec le minimum d'interventions de la part de l'automobiliste. Les véhicules utilisés sont des Toyota Prius hybrides, ainsi qu'un modèle d'Audi TT. Urmsen décrit le comportement du véhicule qu'il a en parti conçu (New York Times, 10 Octobre 2010). Il dit que la voiture s'arrête aux feux tricolores et en fonction de la signalisation. Une voix indique à la personne devant le volant qu'un *carrefour est en approche* ou encore que *le véhicule va tourner de manière imminente*. Le système est censé alerter l'automobiliste d'une quelconque anomalie détectée par la panoplie de capteurs. Il est possible de programmer un comportement au véhicule : en mode *préventif*, celui-ci va suivre un véhicule, alors qu'en mode *agressif*, il va prendre les devants et avancer de lui-même. Il y a trois manières différentes de reprendre le contrôle : en tournant légèrement le volant, en appuyant sur la pédale de frein ou en poussant un bouton rouge situé à côté de la main droite. Le chercheur a repris deux fois le contrôle manuel du véhicule dans des situations qui lui semblaient urgentes, mais le *véhicule semblait avoir prévenu l'accident de lui-même*. Lorsque le mode de

pilotage automatique est enclenché, le véhicule émet des vibrations pour signaler à l'automobiliste que le système gère dorénavant la conduite en toute autonomie.

Figure 5 : Descriptions des dispositifs de conduite sur la *Google self-driving car*



3.7. Conclusions

Que ce soit pour un usage personnel ou pour les transports publics, l'automatisation de la conduite a déjà une envergure internationale. Les industriels et les universitaires collaborent sur de nombreux projets pour capitaliser les connaissances et savoir-faire de chacun. Cependant, le devoir de réserve demandé à certains acteurs ne permet pas de savoir avec précision quels sont les objectifs et avancées de chacun. Cette technologie est un moyen de mettre en valeur des instituts et des sociétés, et il est parfois difficile de trancher pour savoir si une annonce sur un véhicule automatisée a été faite dans une logique de communication publicitaire ou dans une volonté de partage des connaissances.

4. Législation et infrastructure de la conduite automatisée

4.1. De l'importance du vide juridique autour de la conduite complètement automatisée

La question de l'automatisation de la conduite présente des difficultés réelles d'un point de vue légal. Il y a un vide juridique concernant la responsabilité de l'automobiliste dans un véhicule où la conduite est prise en charge par des logiciels et dispositifs informatiques. Les Nations Unies ont rassemblé 84 pays en 1968 pour faire signer la Convention de Vienne sur la signalisation routière, et donner un cadre juridique à la conduite. Le premier chapitre définit ce qu'est une automobile et un automobiliste, ce dernier devant *diriger* le véhicule. En voici des extraits :

Chapitre Premier : Généralités. Art. 1 Définitions

q) Le terme «conducteur» désigne toute personne qui assume la direction d'un véhicule, d'une automobile ou autre (cycle compris), ou qui, sur une route, guide des bestiaux, isolés ou en troupeaux, ou des animaux de trait, de charge ou de selle;

Le chapitre II règles applicables à la circulation routière, Art.8 Conducteurs, définit les conditions requises pour conduire un véhicule et introduit la notion de contrôle du véhicule, que l'automobiliste doit assurer lorsqu'il conduit (Tableau 9) :

Tableau 9 : Extrait de l'article 8, chapitre II de la Convention de Vienne

1. Tout véhicule en mouvement ou tout ensemble de véhicules en mouvement doit avoir un conducteur.	3. Tout conducteur doit posséder les qualités physiques et psychiques nécessaires et être en état physique et mental de conduire.	4. Tout conducteur de véhicule à moteur doit avoir les connaissances et l'habileté nécessaires à la conduite du véhicule; cette disposition ne fait pas obstacle, toutefois, à l'apprentissage de la conduite selon la législation nationale.
5. Tout conducteur doit constamment avoir le contrôle de son véhicule ou pouvoir guider ses animaux.	6. Le conducteur d'un véhicule doit éviter toute activité autre que la conduite.	

Les Etats-Unis n'ont pas ratifié cette convention, néanmoins, la législation outre-Atlantique stipule que l'automobiliste doit avoir le contrôle de son véhicule à tout moment. Dans le cas des expérimentations sur la conduite automatisée, les constructeurs ont été autorisés à faire des essais en public sur certaines routes et zones car l'individu derrière le volant est à même de corriger les erreurs commises par le système.

La question de la responsabilité se pose également pour les véhicules ne proposant encore que des aides à la conduite, notamment au freinage. Ici, le positionnement des constructeurs est d'activer leur système de freinage une fois que le seuil de réactivité d'un être humain a été franchi. D'après McGehee, Mazzae, et Baldwin (2000), le temps moyen de réaction pour freiner est de 1.28 sec, voire de 0.96 sur simulateur. Freiner implique de lâcher l'accélérateur pour ensuite appuyer sur la pédale de frein. Sur la Classe-S de 2013, le freinage d'urgence devient maximum et automatique lorsque la collision est détectée environ 0.6 seconde avant l'impact ; à ce seuil de réactivité, peu d'automobilistes ont les réflexes suffisamment affûtés pour réagir. Le système dans ce cas n'agit que lorsque l'humain ne le peut plus. La collision ne sera pas évitée mais la distance de freinage pourra être réduite.

Bien que promues par les politiques de sécurité routière en France, *les aides à la conduite ne se substitueront jamais à la responsabilité du conducteur*, selon l'ancien ministre de l'Equipeement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer Gilles de Robien (Mercier, 2003, p.2). Il y a la volonté d'équiper le plus possible de véhicules d'aides à la conduite, notamment avec des limiteurs de vitesse, mais ces dispositifs ne doivent pas pour autant déresponsabiliser l'automobiliste. La loi Badinter de 1985 stipule que le *conducteur* du véhicule doit avoir la *maîtrise du véhicule* : si des dispositifs de régulation de vitesse ou de contrôle latéral sont engagés, qui du conducteur ou des systèmes d'assistance maîtrisent le véhicule ?

En outre, la responsabilité du constructeur vis-à-vis des dommages pouvant être causés par son dispositif peut être recherchée, soit sur la base du dispositif/produit lui-même, s'il ne satisfait pas à l'attente de l'automobiliste pour quelque raison que ce soit, soit sur la base de la faute, contractuelle ou délictuelle. Une faute contractuelle renvoie à la mauvaise exécution d'une obligation d'un contrat (par exemple, le système de détection d'objet du véhicule signalera toujours la présence d'un obstacle sur la voie empruntée), tandis que la faute délictuelle concerne un préjudice commis en dehors d'un contrat.

Il est possible d'envisager que le degré de responsabilité s'articule avec le degré d'automatisation de la conduite. Selon que les dispositifs au sein du véhicule informent (GPS), assistent (ABS) ou remplacent (AS, ACC) l'automobiliste, la responsabilité de l'individu ou du constructeur peut varier en fonction des exigences des situations (accident entre un véhicule automatisé et un véhicule classique) et des individus (âge, expérience). La notion de contrôle est au cœur de la responsabilité, et différentes classifications des aides existent en fonction du degré de contrôle du conducteur sur le véhicule (Guilbot, 2014, p.15). Par exemple, deux cas d'usage sont pris en compte. Le premier considère que le conducteur peut avoir le contrôle du système, c'est-à-dire qu'il peut reprendre la main sur la conduite. Le deuxième considère que le système peut fonctionner sans intervention humaine, auquel cas le conducteur n'a pas possibilité de reprendre la main, attribuant la responsabilité au fabricant.

Récemment en France, la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LOI n° 2015-992 du 17 août 2015), autorise le gouvernement à assouplir la législation *afin de permettre la circulation sur la voie publique de véhicules à délégation partielle ou totale de conduite*. Ce texte sera présenté officiellement lors du congrès *Intelligent Transport Systems* à Bordeaux en octobre 2015. Jusqu'à présent, des dérogations permettaient aux constructeurs de faire circuler leurs véhicules automatisés. L'article 37 de cette loi va permettre d'appliquer un cadre légal pour tester sur routes publiques des véhicules automatisés pour les particuliers, le

transport de marchandises et de personnes dans un cadre de recherche expérimentale. Le régime de responsabilité sera adapté en fonction des conditions d'utilisation, du véhicule utilisé et de ses capacités techniques. Bien que la loi ne comporte pas encore de détails, les principes généraux pour utiliser une voiture automatisée dans un cadre expérimentale sont en train d'être posés.

4.2. L'environnement routier et l'infrastructure dans le sillage de l'automatisation

L'automatisation de la voiture sera probablement accompagnée d'une modernisation des autoroutes, comme par exemple le projet route de 5^{ème} génération (Hautiere, De la Rache, & Jacquot-Guimbal, 2013). Ce nouveau type de route vise à :

- établir une communication et échange d'énergie entre l'infrastructure, le véhicule et le gestionnaire du réseau ;
- créer des matériaux recyclables capables de s'auto-diagnostiquer et de s'auto-réparer ;
- assurer état de surface optimal en permanence malgré les variations climatiques, etc.

Des technologies supplémentaires seront intégrées à ces routes afin de compléter les systèmes d'aides à la conduite du véhicule (Stanton & Salmon, 2009). Ces routes seront en quelque sorte intelligentes, et pourront donner des indications aux véhicules automatisés comme la vitesse à adopter, le rayon de braquage ou la puissance de freinage à réaliser. Selon les auteurs, l'utilisation de ces routes intelligentes sera obligatoire et non pas facultatif.

5. Conclusions

Dans ce chapitre, l'automatisation a été définie et introduite dans le domaine de l'automobile. Ce processus, entamé il y a plusieurs décennies et qui prend de plus en plus d'ampleur, vise à remplacer l'automobiliste par un système informatique capable de gérer la conduite. Cette nouvelle manière de conduire, ou plutôt d'être conduit, soulève des questions sur la responsabilité de la conduite mais également sur le rôle des facteurs humains dans l'automatisation. Quelle est la propension des automobilistes à vouloir utiliser cette technologie ? Dans quelle mesure a-t-on confiance dans un système de conduite complètement automatisé ? Il y a-t-il des nouvelles compétences nécessaires pour utiliser un tel système ? Comment peut-on apprendre à utiliser ces nouvelles compétences de conduite ? Quel est l'impact d'un système de conduite complètement automatisé sur les comportements et les attitudes de ses utilisateurs ? Ce sont des questions que nous allons aborder dans le chapitre suivant.

Chapitre III :

Facteurs humains et automatisation

Chapitre III : Facteurs humains et automatisation

1. Introduction

Lorsque l'on évoque la fiabilité et la sécurité d'un système automatisé, le facteur humain, défini comme la nécessité d'améliorer la performance de la composante humaine dans des systèmes techniques (Amalberti, 1998), est souvent considéré comme étant son talon d'Achille (source d'erreurs et d'infractions). Pourtant, l'humain contribue à augmenter la performance d'un système, notamment par ses capacités d'anticipation et d'adaptation. Etant donné que la voiture complètement automatisée vise à être accessible au plus grand nombre, il est important de distinguer les impacts positifs et négatifs de ce système automatisé sur le comportement et les attitudes des individus.

Dans ce troisième chapitre, nous allons introduire dans un premier temps deux concepts dont nous nous servirons pour les études empiriques : le contrôle et la charge de travail. Ensuite, nous développerons deux facteurs de personnalité, le locus de contrôle et la recherche de sensations, qui pourraient avoir une influence importante sur les usages de la conduite complètement automatisée. Nous évoquerons par la suite l'adaptation comportementale des conducteurs lors de l'utilisation de cette technologie, ainsi que les relations entre leurs caractéristiques et un système de conduite complètement automatisée. Ensuite, nous consacrerons un sous-chapitre aux facteurs les plus centraux de cette thèse : l'acceptabilité, la confiance, l'apprentissage, les compétences de conduite et la réalisation de tâches non reliées à la conduite pendant que le pilotage automatique est actif ou lorsque des aides à la conduite sont actives.

1.1. Le contrôle

1.1.1. *Quelle définition?*

Le contrôle, de manière générale, comprend un aspect physique et un aspect cognitif. Pour l'aspect physique, le contrôle est la maîtrise, à différents degrés, d'un objet ou d'une personne. Le contrôle cognitif est la compréhension et la conscience, à différents degrés, d'une situation dans un environnement donné. Ces deux aspects du contrôle peuvent varier en fonction de leur intensité, fréquence, durée, et qualité. La capacité de contrôle peut varier selon les individus, en fonction de leurs capacités cognitives, de leur expérience, leur expertise, et leur état physique.

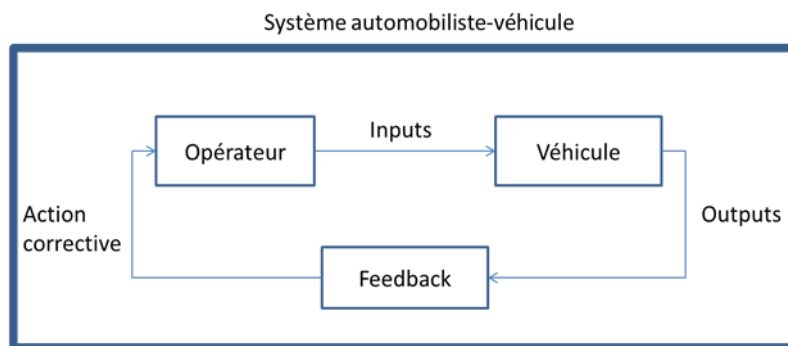
Le contrôle de la conduite est d'une part la maîtrise par le conducteur, à différents degrés, de la trajectoire du véhicule, de la vitesse, et de son placement sur la route. D'autre part, le contrôle de la conduite est également la compréhension et la conscience de la situation de conduite par le conducteur.

1.1.2. *La boucle de contrôle*

La boucle de contrôle, ou boucle de régulation, est un terme utilisé aussi bien en ingénierie qu'en psychologie ou en ergonomie. Dans le cadre de la conduite complètement automatisée, la boucle de contrôle inclurait à la fois le contrôle manuel du véhicule et le contrôle cognitif de la situation. La boucle de contrôle est un système dynamique composé de l'automobiliste et de son véhicule sur la route. Le système ainsi constitué régule son activité, c'est-à-dire la conduite, en établissant des relations et des connexions entre ses acteurs. Par exemple, l'automobiliste utilise les fonctionnalités et dispositifs du véhicule, comme tourner le volant ou appuyer sur les pédales (*inputs*), ce qui provoque une rétroaction (*output*) : le véhicule réagit à ces manipulations en tournant ses roues pour changer de trajectoire et en injectant de l'essence dans le moteur pour accélérer. L'automobiliste peut vérifier que la

voiture exécute bien les manœuvres décidées car le véhicule se déplace dans l'environnement et le tableau de bord indique les variations de vitesse ainsi que le régime moteur. C'est entre autres de cette manière que la voiture transmet un retour d'information (feedback) à l'automobiliste sur l'état du système. En conduite manuelle, l'automobiliste est actif et prend en charge les manipulations nécessaires au bon fonctionnement du système automobiliste-véhicule. L'automobiliste est considéré comme étant attentif à son environnement, et suffisamment compétent pour garder le contrôle de la situation tout comme celui de son véhicule (Figure 6).

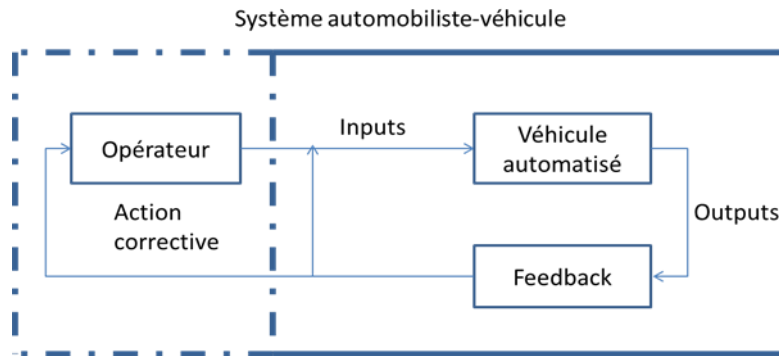
Figure 6 : Boucle de contrôle de la conduite manuelle de véhicule



Cependant, la boucle de contrôle est différente si le véhicule est automatisé. En effet, lorsque la conduite est en mode de pilotage automatique, il est probable que l'automobiliste ne soit plus engagé dans la tâche de conduite si ce dernier n'est pas obligé de superviser le système. L'automobiliste ne manipule plus lui-même une ou plusieurs des commandes du véhicule, par exemple les pédales et le volant s'il utilise un système de conduite complètement automatisée (CCA), ce qui lui fait perdre le contrôle direct des activités de régulation de vitesse et de contrôle de la trajectoire. Parce que les contrôles longitudinal et latéral du véhicule sont gérés par un ordinateur, l'individu n'est plus acteur mais observateur, contrôleur, voire déconnecté en partie de la boucle de contrôle de la conduite. Le niveau d'engagement de l'automobiliste dans la conduite est diminué ou nul. Cela peut l'amener à ne plus prêter d'attention à la conduite car elle est prise en charge par le système.

L'automobiliste n'a plus le contrôle manuel en temps réel du système, mais peut décider de le reprendre (Figure 7).

Figure 7 : Absence de contrôle manuel de la conduite automatisée de véhicule



Autrement dit, lorsque le système homme-machine fonctionne normalement, cette notion de boucle de contrôle n'est pas nécessairement observable, il n'y a pas d'indicateur particulier permettant d'affirmer que l'humain contrôle le véhicule. Ce n'est que lorsque l'automobiliste ne fait plus partie de la boucle de contrôle qu'elle peut être observée, car les performances du système en sont affectées (Endsley, 1996 ; Parasuraman, 2000 ; Stanton *et al.*, 1996 ; Stanton, Young & McCaulder, 1997 ; Young & Stanton, 1997, 2002a, 2007 ; Wickens, 1992, Parasuraman & Mouloua, 1996). L'automobiliste, en situation de supervision ou non, peut éprouver des difficultés à reprendre le contrôle manuel du véhicule de manière immédiate et à comprendre la situation dans laquelle il se trouve si, par exemple, le système de conduite automatisé ne peut plus gérer la conduite. Les conséquences de la sortie de la boucle de contrôle sur les performances du système sont en partie résumées par Kaber *et al.* (1997) :

- l'échec de l'opérateur à voir les changements de paramètres du système et d'intervenir en cas de nécessité (baisse de la vigilance) ;
- la surconfiance de l'opérateur dans les systèmes de contrôle informatisés (phénomène de contentement) ;

- la méconnaissance de l'opérateur vis-à-vis de la situation en cours ou du statut du système ;
- la dégradation des compétences de contrôle manuel.

Wickens et Kessel (1981) avaient déjà suggéré que lorsqu'un individu au sein d'un système automatisé ne le contrôle plus manuellement ni ne le supervise, cela correspondait à la réduction de l'attention portée à l'état du système. Cette observation est appuyée par Logan (1988) qui définit l'activité de surveillance d'un système comme une allocation de ressources attentionnelles. Si l'individu cesse de contrôler une activité, l'attention qu'il lui avait dédiée est reportée sur un autre objet. Stanton *et al.* (2002a) insistent sur le fait qu'assister l'automobiliste permet de le garder dans la boucle, alors que le remplacer fait qu'il est exclu de la boucle de contrôle. La boucle de contrôle permet de relever l'importance de la reprise de contrôle du véhicule, c'est-à-dire la transition entre le mode de pilotage automatique au mode de pilotage manuel. Reprendre le contrôle d'un véhicule complètement automatisé, c'est à la fois être engagé dans la conduite en faisant attention à l'état du système (ordinateur et véhicule au sein du trafic), mais aussi prendre le contrôle manuel du véhicule via ses commandes (pédales et volant).

1.1.3. Conscience de la situation

Un concept important de la conduite automatisée est celui de la conscience de l'état du système et de son influence sur le comportement du véhicule (*situation awareness*). C'est un domaine particulièrement étudié dans l'aviation (Endsley, 1995). La conscience de la situation est la faculté de créer des modèles de fonctionnement du monde réel, pour ensuite donner sens à l'information que l'on reçoit et éventuellement la réutiliser afin de faire des prédictions d'évènements ou d'états à venir. La conscience de la situation c'est l'acquisition et l'interprétation d'informations provenant de l'environnement dans lequel se trouve un individu. Un modèle de la conscience des situations au sein de systèmes dynamiques a été

développé (Endsley, 1995 ; Endsley & Kiris, 1995 ; Jones & Endsley, 1996), et distingue trois différents niveaux :

- le premier est la perception des éléments de l'environnement,
- le deuxième est la compréhension de la situation actuelle,
- le troisième est la projection du statut futur du système.

Ce modèle permet de distinguer trois niveaux d'informations et des risques d'erreurs associés lorsqu'un ou de plusieurs de ces trois niveaux sont mal intégrés. Un individu pourrait avoir une conscience de la situation insuffisante s'il y avait une carence dans un ou plusieurs de ces trois niveaux. Ainsi, il serait possible de mieux comprendre comment améliorer la qualité de la conscience de la situation si on identifiait à quel niveau se situait la défaillance.

La rupture de la boucle de contrôle homme-machine (Figure 7) dépend entre autre de la qualité de la conscience de la situation. A cela s'ajoute la nécessité d'un retour d'information optimisé du système de conduite automatisé à l'automobiliste afin que celui-ci reste au courant des opérations de conduite en cours, ainsi que de l'évolution de l'environnement de conduite. Toutefois, l'automobiliste peut ne pas prendre en compte le retour d'information, il y a une différence entre recevoir l'information et la traiter en profondeur. La reprise de contrôle du véhicule est meilleure lorsque l'automobiliste a le contrôle manuel du véhicule que lorsqu'il utilise des aides à la conduite type ACC ou AS (Desmond *et al.*, 1998). Être désengagé d'une activité puis la reprendre subitement (être en mode de conduite automatisée puis reprendre le contrôle manuel) peut également avoir des conséquences sur la charge de travail des individus.

1.2. La charge de travail

La charge de travail est définie comme une construction multidimensionnelle (Young & Stanton, 2001, p.507) qui *représente le niveau de ressources attentionnelles requis pour atteindre les critères de performances aussi bien objectifs que subjectifs, qui eux-mêmes dépendraient de la demande, du support extérieur et de l'expérience passée*. De manière concise, la charge de travail est la part requise de la capacité limitée d'un opérateur pour réaliser une tâche spécifique (O'Donnell & Eggemeier, 1986). Dans le domaine de l'automobile, la charge de travail est considérée ici comme fonction des exigences de la tâche. Ces exigences déterminent le niveau de la charge de travail requise pour réaliser la tâche. L'individu décide des ressources qu'il alloue pour combler ces exigences. Ce procédé requiert plus ou moins d'efforts selon les individus (Casali & Wierwille, 1984), et pourrait être problématique lorsque la RCM est nécessaire en situation d'urgence. Le fait de réaliser une autre tâche lorsque la CCA est active implique un autre type de charge de travail, qui est physique en plus d'être mentale. La charge de travail est souvent analysée au travers de ses aspects mentaux, mais moins souvent au travers de ses aspects physiques. L'utilisation d'un véhicule complètement automatisé pourrait avoir une influence à la fois positive et négative sur la charge de travail de l'automobiliste. Les aspects positifs concerneraient une amélioration de la sécurité, notamment pour les distances de sécurité entre le véhicule de devant (Jamson *et al.*, 2013) et une diminution de la charge de travail (Young *et al.*, 2007 ; Stanton *et al.*, 1997 (pour une revue issue de l'extrapolation du domaine de l'aviation, voir Stanton *et al.*, 1996). Une méta-analyse regroupant près de 30 études dévoile que conduire à bord d'un véhicule hautement automatisé, comparé à l'utilisation d'aides à la conduite type ACC (Adaptive Cruise Control) ou AS (Auto-Steering), entraîne une diminution de la charge de travail (De Winter, Happee, Martens & Stanton, 2014).

Les aspects négatifs de l'utilisation d'un véhicule complètement automatisé sur la charge de travail seraient caractérisés par la fatigue passive, associée à une faible charge de travail et un manque de contrôle direct sur la tâche, ainsi qu'à la fatigue active, associée à une surcharge de travail (Desmond & Hancock, 2001). De manière générale, la surcharge de travail diminue la qualité de la décision (Abdel-Khalik, 1973 ; Chewning & Harrell, 1990 ; Shields, 1980 ; Snowball, 1980), augmente le temps nécessaire pour prendre une décision, et favorise la confusion à l'égard de la décision (Cohen, 1980 ; Jacoby, Speller, & Kohn, 1974a, 1974b ; Malthotra, Jain, & Lagakos, 1982). La sous-charge de travail chez les automobilistes implique une baisse des ressources allouées à la tâche, pouvant entraîner une sur-sollicitation de l'attention, de la réactivité et des compétences de contrôle du véhicule lorsqu'une intervention du conducteur est requise (Young *et al.*, 2007). Les capacités pour réagir à une demande exigeante sont fortement mises à contribution et rendent une intervention de l'humain difficile. L'un des principes de toute forme d'automatisation est que les demandes faites aux opérateurs humains soient réduites (Bainbridge, 1983, 1992). Dans le cas de la conduite complètement automatisée, lorsque cette réduction est trop importante, elle peut entraîner une sous-charge de travail qui peut entraver la reprise de contrôle manuel du véhicule, particulièrement en situation d'urgence ou lors d'une erreur du système (Norman, 1990).

Stanton *et al.* (1997) ont mené une expérience sur simulateur de conduite sur la charge de travail de 30 automobilistes lors de la reprise de contrôle manuel du véhicule avec l'utilisation de l'ACC. Deux tâches différentes devaient être exécutées par les participants, tous détenteurs du permis de conduire : la conduite d'un véhicule équipé du système ACC, ainsi qu'une tâche secondaire de discrimination de formes géométriques (losanges vs. carrés dans des drapeaux tenus par des personnages dessinés en fil de fer), la rotation de figures de Baber (1991), qui apparaissait en bas à gauche de l'écran du simulateur. Cette tâche occupait

aussi bien l'attention visuelle (observation des figures) que manuelle (répondre en appuyant sur l'un des deux boutons à disposition). L'objectif de la tâche secondaire était de quantifier la capacité d'attention partagée des automobilistes, qui est la capacité à diriger son attention sur différentes sources d'informations avec moins d'efficacité que l'attention sélective qui ne traite qu'une seule source. C'est une mesure de la charge cognitive. Il leur était demandé d'exécuter la tâche secondaire dès lors que la conduite (tâche principale) le leur permettait. Trois conditions expérimentales ont été mises en place. Dans la première condition, les automobilistes étaient en mode de pilotage manuel et devaient suivre un véhicule. Ce faisant, ils devaient faire la tâche secondaire dès qu'ils le pouvaient. Dans la deuxième, ils devaient suivre un véhicule et, une fois arrivés à la distance permettant l'utilisation de l'aide à la conduite, engager l'ACC pour suivre ce véhicule. Ils devaient également exécuter la tâche secondaire dès qu'ils estimaient que c'était possible. La troisième condition était semblable à la deuxième, à la différence que l'ACC avait une défaillance : dans ce cas, les automobilistes devaient reprendre le contrôle manuel de la voiture. Les résultats ont révélé que la charge de travail est réduite significativement quand le système ACC est engagé, c'est-à-dire qu'ils ont eu de meilleures performances pour la tâche secondaire. De plus, un tiers des participants était entré en collision avec le véhicule de devant lorsqu'une défaillance de l'ACC était activée car ils n'étaient pas en mesure de reprendre le contrôle manuel du véhicule à temps.

Pourtant, les systèmes automatisés pourraient être utiles dans des conditions où une importante charge de travail implique des états de fatigue active. Toutefois, ils pourraient accentuer les effets de la fatigue passive pouvant résulter de la conduite sur routes monotones (May & Baldwin, 2009). Différentes études (Saxby, Matthews, Hitchcock & Warm, 2007 ; Saxby, Matthews, Hitchcock, Warm, Funke & Gantzer, 2008) montrent que des niveaux importants de fatigue passive et d'inconfort sont observés après avoir utilisé des aides à la conduite. Une autre étude sur piste fermée de Rudin-Brown & Parker (2004) révèle que la

réduction de la charge de travail entraînée par l'ACC peut inciter les automobilistes à reporter leur attention à d'autres tâches de la conduite, voire à une toute autre activité. Concernant l'automatisation complète de la conduite (accélération, freinage et direction assurés par le système), elle ne parvient pas à prévenir la fatigue, que ce soit lorsque l'automatisation est imposée ou bien lorsque l'automobiliste décide de l'enclencher (Neubauer, Matthews, & Saxby, 2012). Et Reinartz & Gruppe (1993) d'avancer que les systèmes automatisés entraînent des exigences cognitives qui augmentent la charge de travail plus qu'elles ne la diminuent, bien que cette observation, contradictoire avec les travaux de Rudin-Brown et Parker (2004), ne concerne pas le domaine de la conduite automatisée.

En ce qui concerne la conduite manuelle, les tâches exigeantes visuellement (écrire des messages) sont associées avec un risque de collision plus élevé que les tâches cognitives (parler au téléphone avec un kit mains-libre ; Young & Lenné, 2010). Peu d'études ont examiné l'effet de tâches exigeantes visuellement, cognitivement et physiquement lorsque la CCA est active.

Young et Stanton (2002b) ont construit un modèle sur la variation des ressources utilisées par les automobilistes lors des tâches manuelles et partiellement automatisées. Ce modèle des *réserves de ressources malléables* (*malleable resource pools*) stipule que, dans des conditions de faible demande, les ressources d'un opérateur se réduiraient pour suffire à la demande, au contraire du principe selon lequel notre cerveau continuerait de fonctionner au même régime lorsqu'on le sollicite *a minima*. Ainsi, tout déséquilibre soudain (échec du système ACC in Stanton *et al.*, 1997) pourrait mener à une dégradation de la performance (éviter une collision lors de la reprise de contrôle manuel du véhicule). De cette manière, une charge de travail réduite peut mener à la dégradation de la performance indépendamment des causes attribuées à la vigilance ou au retour d'information. Ce modèle tient aussi compte de l'aspect physique de la charge de travail, ce qui semble en adéquation avec l'utilisation d'un

véhicule complètement automatisé, notamment lorsque les automobilistes lâchent les commandes pour manipuler d'autres objets (un téléphone, un café, de la nourriture etc.). Toutefois, dans un véhicule complètement automatisé, si la conduite est prise en charge par le système, la tâche habituellement secondaire devient tâche principale.

1.3. Facteurs de personnalité

1.3.1. *Locus de contrôle*

Le locus de contrôle, ou lieu de contrôle, est défini comme un trait de personnalité renvoyant à la propension d'une personne à croire qu'il ou elle peut contrôler les événements qui l'affectent (Rotter, 1966). Le locus de contrôle est le degré de contrôle perçu par un individu. Celui ou celle qui estime pouvoir contrôler des événements a un locus de contrôle interne, alors que celui ou celle qui ne le croit pas a un locus de contrôle externe. Par exemple, un individu va avoir tendance à considérer que son échec à un examen est dû à des causes externes (questions trop difficiles, mauvaises conditions d'examen etc.) s'il a un locus de contrôle externe. Pour lui, les événements en général sont davantage considérés comme influencés par la chance, le destin. A l'inverse, un individu ayant un locus de contrôle interne attribuera cet échec à des causes internes (incompétence, manque de motivation, de travail etc.). Au regard de la conduite partiellement automatisée, les individus ayant un locus de contrôle externe sont davantage sur-confiants que les internes ; ce résultat a été observé sur simulateur mais pas sur piste (Rudin-Brown & Ian Noy, 2002). De plus, le locus de contrôle n'affecte pas l'utilisation d'un régulateur de vitesse adaptatif (ACC) (Stanton *et al.*, 2005), alors qu'il augmente le temps de réaction des externes lorsque l'ACC a une défaillance (Rudin-Brown *et al.*, 2004).

Montag et Comrey (1987) ont développé une échelle de mesure du locus de contrôle de la conduite automobile comprenant deux dimensions indépendantes (interne et externe), et non deux concepts opposés d'une même dimension. Cette échelle a pour but initial d'évaluer

le degré d'implication perçu dans des accidents automobiles fatals. Il pourrait être plus facile pour les automobilistes externes d'accepter de ne pas contrôler le système de conduite complètement automatisée et de relâcher leur attention, car ils comptent moins sur leurs compétences de conduite que les internes (Rudin-Brown *et al.*, 2002). Le locus de contrôle pourrait expliquer en partie pourquoi et comment des individus utilisent la conduite complètement automatisée, mais d'autres concepts permettraient de nourrir ces interrogations.

Etant donné que cette technologie est nouvelle et permettrait aux utilisateurs d'adopter de nouveaux comportements, comme utiliser la conduite complètement automatisée alors que l'on n'est pas en état de conduire, il semble pertinent d'investiguer la recherche de sensations au regard de la conduite complètement automatisée. La recherche de sensations pourrait également dans une certaine mesure expliquer l'acceptabilité de cette technologie.

1.3.2. Recherche de sensations

La recherche de sensations est *le besoin de sensations et d'expériences variées, nouvelles et complexes ainsi que la volonté de prendre des risques physiques et sociaux au nom de telles expériences* (Zuckerman, 1979). La recherche de sensations est un comportement qui a des racines biologiques, ce qui explique une partie des différences interindividuelles entre les chercheurs de sensations et les timorés (Eysenck 1983 ; Ebstein *et al.*, 1996). Ce concept est composé de quatre dimensions : la recherche d'aventures, la recherche d'expériences nouvelles, la désinhibition et la susceptibilité à l'ennui.

La recherche de sensations est corrélée positivement avec la prise de risque, notamment pour la conduite (Jonah, Thiessen, & Au-Yeung, 2001 ; Zuckerman, 1994). Une autre échelle plus spécifique, *l'échelle de recherche de sensations au volant*, (Taubman, Mikulincer, & Iram, 1996, adaptée par Delhomme, 2002) est également corrélée positivement à l'intention d'excès de vitesse (Cestac, Paran, & Delhomme, 2011 ; Delhomme, Verlhac, & Martha, 2009 ; Yagil, 2001). De fait, il est vraisemblable que les chercheurs de sensations

aient plus l'intention d'utiliser une voiture complètement automatisée que les individus ne cherchant pas les sensations, notamment car les chercheurs de sensations sont attirés par la nouveauté et l'aventure. Néanmoins, déléguer la conduite pourrait être moins grisant que conduire manuellement. Il a été montré que lorsqu'un régulateur de vitesse adaptatif est utilisé, les chercheurs de sensations conduisent en moyenne plus rapidement, avec une inter-distance entre véhicules plus réduite et réalisent des freinages plus forts (Hoedemaeker & Brookhuis, 1998 ; Ward, Humphrey, & Fairclough, 1996). De fait, les chercheurs de sensations pourraient adapter leur comportement lorsqu'ils sont conduits par un système informatisé dans leur propre véhicule en faisant preuve de moins de précautions par ailleurs (consommation de substances psychoactives).

1.4. Adaptation comportementale

L'adaptation comportementale due à l'utilisation d'aides à la conduite pourrait être expliquée par la volonté de maintenir un certain niveau de difficulté dans une tâche, d'après la théorie de l'homéostasie de la difficulté perçue de la tâche (Fuller, 2005). Cette théorie stipule que, lorsque la conduite est facile, le conducteur va prendre plus de risques que lorsque la conduite est difficile. L'adaptation comportementale lors de l'utilisation d'un ACC peut entraîner des mauvais usages du dispositif et ainsi réduire les bénéfices de confort et de sécurité qu'il pourrait procurer (Piccinini, Simões, & Leitão, 2011). Dans le contexte de la CCA, la difficulté de la tâche de conduite, définie comme l'interaction dynamique entre les déterminants des exigences de la tâche et des capacités du conducteur, pourrait ne plus avoir d'intérêt car elle est déléguée à un système informatique. Cette substitution perçue par l'automobiliste de son rôle de conducteur pourrait l'amener à prendre plus de risques pour maintenir un niveau de risque qu'il considère comme satisfaisant. Etant donné que ses compétences de conduite ne sont plus sollicitées, il pourrait décider de réaliser une autre activité que la conduite (lire un journal, regarder ses emails sur son téléphone, manger, etc.),

bien que cela puisse être considéré comme quelque chose de normal car suggéré par la CCA, plus que comme une réelle prise de risque. Il pourrait aussi abandonner la supervision du système que celle-ci soit requise ou non, voire même utiliser la CCA alors qu'il ne le devrait pas (en état physique dégradé) ce qui constituerait une réelle prise de risques. Abandonner la supervision ou utiliser la CCA en état dégradé pourrait augmenter la difficulté de la dernière tâche de conduite lorsqu'on utilise la CCA : la reprise de contrôle manuel du véhicule.

Bastien, Scapin et Leulier (1998) abordent un autre concept qui est l'adaptabilité d'un système. L'adaptabilité d'un système témoigne de sa faculté à réagir selon l'environnement et selon les attentes et besoins des utilisateurs. La notion de flexibilité du système est mise en avant par les auteurs pour insister sur la nécessité de s'adapter aux interactions de l'utilisateur ainsi qu'à son histoire, à savoir l'expérience utilisateur.

1.5. Influence de l'âge, de l'expérience et des conditions de trafic sur la reprise de contrôle manuel

Les temps de réponse des pieds et des mains sont affectés par l'âge dans une étude sur 400 conducteurs réalisée par Groeger, Field et Hammond (1980). Les jeunes sont plus rapides, aussi bien avec les mains (appuyer sur la touche d'un clavier) qu'avec les pieds (bouger le pied d'une position de repos vers une pédale) dans des situations anticipées et inattendues. Les temps de réponses sont plus courts lorsque les mains sont utilisées comparés aux pieds. De manière similaire, les temps de réponse pour freiner dans un simulateur sont plus courts pour les conducteurs jeunes (âgés de moins de 25 ans) que pour les plus âgés (de 26 à 49 et de 50 ans et plus ; Warshawsky-Livne & Shinar, 2002).

L'expérience de conduite, qu'elle soit manuelle ou avec des aides, pourrait aider les conducteurs dans des situations dangereuses et critiques en mode de CCA étant donné que les plus expérimentés ont été confrontés à de plus nombreuses situations inattendues, alors que

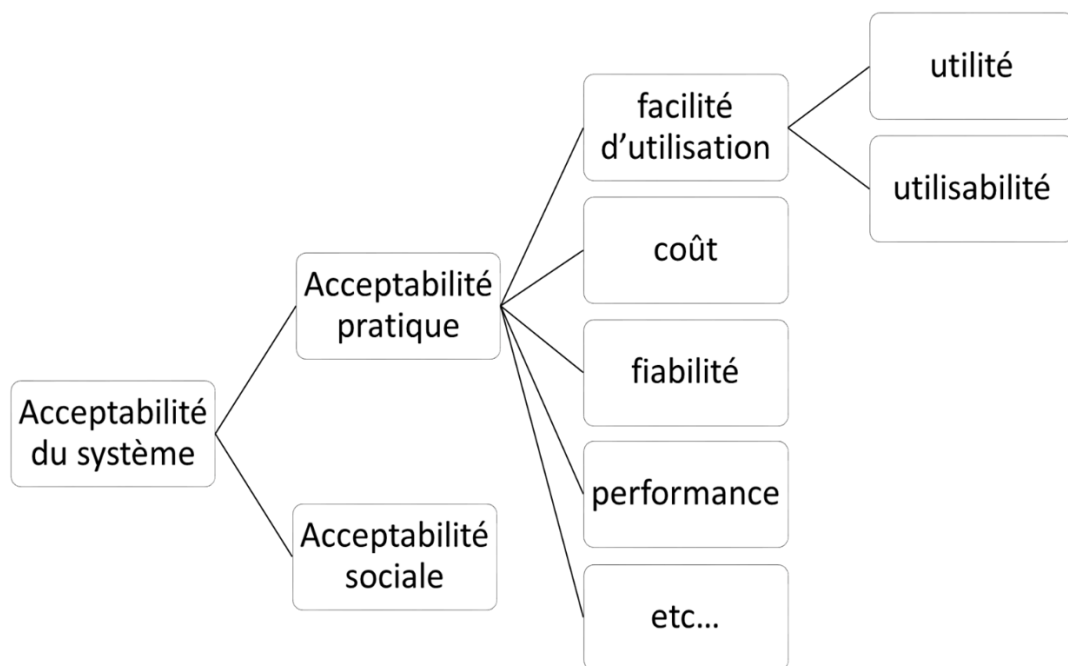
les conducteurs novices n'ont pas encore l'expérience d'une grande variété de situations de conduites.

Au regard des conditions de circulation, une synthèse d'étude par Dingus, Jahns, Horowitz et Knipling (1998) révèle que les temps de réponse de freinage dans une voiture manuelle lors d'un évènement inattendu sont influencés par le type d'obstacle détecté, surtout s'il est dans la trajectoire du véhicule, ce qui expliquerait les temps de réponse plus longs pour un évènement inattendu et peu dangereux (des feuilles sur la route) et les plus courts pour un évènement vraiment surprenant et dangereux (un tonneau lancé sur la trajectoire du véhicule). Ce dernier résultat est cohérent avec ce qu'ont trouvé Davis, Schweizer, Parosh, Lieberman, et Apter (1990) : les temps de réponse de freinage sont plus courts dans des situations avec du trafic. Les auteurs suggèrent que plus les véhicules sont proches les uns des autres, plus le conducteur fait attention. Ainsi, il semble pertinent d'examiner les effets de la présence d'objets sur la route, comme des véhicules lorsqu'une reprise de contrôle manuel d'urgence est nécessaire dans une voiture complètement automatisée.

2. Acceptabilité d'un système

L'acceptabilité d'un système est un concept constitué de deux dimensions principales, l'acceptabilité sociale et l'acceptabilité pratique (Nielsen, 1994, voir Figure 8). L'acceptabilité pratique est décomposée en plusieurs sous-dimensions, dont la facilité d'utilisation qui correspond à l'utilité et à l'utilisabilité perçues d'un système par les usagers. L'utilisabilité comporte cinq caractéristiques : la facilité à apprendre, l'efficience, la mémorisation, la prévention des erreurs et le sentiment de satisfaction. L'utilité perçue est la relation entre ce que la technologie est en mesure de réaliser et ce que l'utilisateur veut en faire (Tricot, Plégat-Soutjis, Camps, Amiel, Lutz, & Morcillo, 2003).

Figure 8 : Taxonomie de l'acceptabilité d'un système, d'après Nielsen (1994)



2.1.1. Acceptabilité pratique d'un système

L'utilité et la facilité d'utilisation perçues par les utilisateurs ont été repris du *Technology acceptance model* (TAM, Davis *et al.*, 1989). Le TAM ajoute davantage de précisions sur la manière d'évaluer une technologie. Ce modèle postule d'une part que les intentions d'utilisation d'une technologie ont une incidence sur le comportement d'usage, et

d'autre part que l'utilité et la facilité d'utilisation perçues déterminent l'intention d'utilisation. Par ailleurs, l'intention comportementale peut être prédite par les attitudes (Albarracin, Johnson, & Zanna, 2005 ; Fishbein & Ajzen, 1975). Il semble raisonnable alors de s'attendre à ce que l'intention d'utilisation d'une technologie/objet puisse être prédite d'une certaine manière par son acceptabilité et par les attitudes des utilisateurs, et ce d'autant plus que l'acceptabilité *a priori* et les attitudes sont corrélées (Parasuraman, Singh, Molloy, & Parasuraman, 1992). Les attitudes sont globalement positives envers les systèmes de conduite partiellement automatisés sur simulateur (Nilsson, 1995; Stanton *et al.*, 1997 ; de Waard *et al.*, 1999). En outre, déléguer la conduite peut être tentant lorsqu'un voyage est considéré comme monotone ou déplaisant (Fancher, Ervin, Sayer, Hagan, Bogard, Bareket *et al.*, 1998), confirmant que les cas d'usage ont un rôle majeur dans l'acceptabilité des systèmes d'aides à la conduite. En effet, la congestion du trafic et les trajets sur autoroute semblent être des situations dans lesquelles la conduite partiellement automatisée pourrait avoir des bénéfices sur le confort de la conduite, d'après des études sur un régulateur de vitesse adaptatif (Saad & Villame, 1996). Enfin, les hommes seraient plus enclins que les femmes à utiliser cette technologie (Venkatesh, Morris, & Ackerman, 2000). Les auteurs ne reportent pas l'effet de l'âge sur l'acceptabilité de la technologie dans leur étude. Enfin, si le niveau de conduite complètement automatisé était en mesure de remplacer les conducteurs par un système de pilotage automatique, ils pourraient penser qu'ils ne sont pas juste assistés mais remplacés par le système de conduite automatisée. Ainsi, être remplacé pourrait entraîner aussi bien le rejet que l'adhésion d'un système de conduite automatisée, en fonction des traits de personnalité de l'automobiliste.

Pour que les systèmes automatisés d'aide à la conduite n'entravent pas la conduite, Landsown et Fowkes (1998) suggèrent que leur design supporte la mise à disposition d'informations simples et claires permettant à l'automobiliste de choisir par lui-même quand

il doit interagir ou non avec de tels équipements. Ce critère est un élément de l'utilisabilité du système. D'après les auteurs, l'automatisation devrait être collaborative et non pas intrusive, c'est-à-dire qu'elle devrait laisser à l'automobiliste la liberté de choisir quelles fonctions il souhaite déléguer au système automatisé, et quelles fonctions il souhaite prendre en charge manuellement. Ce type d'automatisation n'est pas imposé mais choisi. Une étude impliquant 26 participants sur des tâches multiples, à savoir la supervision d'un système, l'ajustement d'une cible et la gestion dynamique de ressources virtuelles (Harris, Hancock, Arthur, & Caird, 1995), a mis en évidence que la performance est meilleure (précision de la supervision, baisse de la charge de travail et de la fatigue) quand les participants avaient le choix d'activer l'automatisation, par rapport à des situations où ils ne pouvaient choisir si le système était automatisé ou non. Ce résultat plaide en faveur d'une automatisation à la carte, c'est-à-dire que les fonctions automatisées seraient choisies par l'individu.

2.1.2. *Acceptabilité sociale d'un système*

L'étude des interactions homme-machine a permis de développer des solutions permettant d'assurer une qualité ergonomique des systèmes techniques, notamment *l'expérience utilisateur* et la *démarche de conception itérative*. Néanmoins, cela ne suffit pas à garantir l'utilisation optimale d'un dispositif tel qu'il a été conçu (Dubois & Bobillier-Chaumon, 2009). Les propriétés fonctionnelles d'un système ne lui garantissent pas d'être accepté par l'utilisateur ; il est également important de considérer l'acceptabilité des systèmes en l'élargissant à des dimensions psychosociales et organisationnelles (Benedetto-Meyer & Chevalet, 2008). Par exemple, les automobilistes sont préoccupés par la manière dont les autres pourraient juger leur comportement lorsqu'ils utilisent ces aides à la conduite (Malaterre *et al.*, 1984). Ce genre d'attitudes témoigne de la dimension sociale de l'acceptabilité.

D'autres travaux révèlent des variations d'attitudes et de comportements à l'égard de l'automatisation des fonctions de la conduite. De telles variations peuvent être dues aux caractéristiques psychologiques de l'individu, aux caractéristiques de la situation de conduite ou encore aux dispositifs eux-mêmes. En effet, les automobilistes sont influencés par les caractéristiques de la route et du trafic quant au choix d'utiliser des systèmes d'aide à la conduite (l'ACC in Fancher *et al.*, 1998). Özkan, Lajunen, et Kaistinen (2005) avancent que des compétences de conduite élevées en terme de sécurité couplées à un locus de contrôle externe (perception qu'a un individu de ne pas contrôler les événements auxquels il est confronté) sont liés à une attitude positive à l'égard des technologies d'aide à la conduite. Cependant, les automobilistes estimant avoir de bonnes habiletés motrices seraient plus enclins à rejeter ces technologies. Enfin, les conducteurs ont tendance à désengager le dispositif ISA (Intelligent Speed Adaptation, limiteur de vitesse qui ne gère pas les inter-distances) pour adapter leur vitesse au trafic environnant, c'est-à-dire que les conducteurs préféreraient être en excès de vitesse plutôt que d'être seuls à respecter la limitation (Carsten & Fowkes, 2000).

Plusieurs études montrent que les automobilistes peuvent être réfractaires à l'idée d'utiliser des systèmes d'aide à la conduite de type limiteur de vitesse, régulateur de vitesse ou détecteur de collisions. En effet, ces dispositifs impliqueraient de ne plus se fier aux règles informelles pour gérer les interactions ni aux stratégies habituelles de mener certaines tâches (Saad & Villame, 1996). Qui plus est, les dispositifs d'aides à la conduite qui diminuent le contrôle (prise de décision) pourraient être moins acceptés par les conducteurs (van der Laan *et al.*, 1997). En effet, bien que ces aides soient évaluées positivement comme étant utiles et sûres, les conducteurs ont un jugement négatif à l'égard des individus qui ont choisi d'utiliser de tels dispositifs car ils sont considérés comme des mauvais conducteurs (Lefeuvre *et al.*, 2008). Dans une recherche sur le mode partiellement automatisé, le conducteur ne contrôle

pas directement les tâches de conduite classiques telles que la navigation, le contrôle ou l'identification des dangers (Stanton *et al.*, 2001), ce qui pourrait donc contribuer in fine à un rejet des aides à la conduite, et constituer un paradoxe entre l'évaluation subjective positive d'une technologie et la faible intention de l'utiliser.

2.1.3. *Acceptabilité a priori d'un système*

L'acceptabilité *a priori* d'une technologie peut être définie comme l'évaluation pratique et sociale de cette technologie avant interaction avec celle-ci. L'acceptabilité *a priori* d'une technologie devrait être traitée en prenant en compte l'évaluation de la technologie en elle-même et de la méthodologie utilisée pour l'évaluer (Bagozzi, 2007), ainsi que ses potentiels usages (Laurencin *et al.*, 2004 ; Terrade, Pasquier, Reerinck-Boulanger, Guingouain, & Somat, 2009).

L'acceptabilité d'un système inclut la dimension de fiabilité (Nielsen, 1994) qui est liée à la confiance. On peut se poser la question du degré de confiance qui va être attribué à cette nouvelle technologie qui prend en charge la conduite. De plus, des différences interindividuelles pourraient avoir un impact sur la confiance accordée au système (selon que l'on soit technophile, expérimenté en conduite, ou familier à l'utilisation d'aides à la conduite). Dans quelle mesure la confiance envers un tel système peut-elle varier ?

3. Confiance : modèles et impacts sur la conduite automatisée

Nous allons mettre en relation deux conceptions de la confiance qui sont proches. Lee *et al.* (2004) décrivent la confiance en fonction de différents degrés, alors que Muir (1994) la catégorise. La confiance a été définie dans l'introduction comme *l'attitude à l'égard d'un agent qui va aider à réaliser les objectifs d'un individu dans une situation caractérisée par l'incertitude et la vulnérabilité* (Lee & See, 2004, p.54). Cette définition de la confiance est particulière à la relation entre des individus et un système automatisé. Cependant, d'autres auteurs la qualifient comme étant un trait de personnalité (Rotter, 1967), la volonté d'un sujet (Johns, 1996, p.81 ; Mayer, Davis & Schoorman, 1995, p.712 ; Moorman, Deshpande, & Zaltman, p.82) ou encore une émotion (Plutchik, 1980). Dans la même perspective que Lee *et al.*, (2004), Muir (1994) a articulé la confiance avec l'automatisation d'un système. Ce modèle comprend quatre niveaux de comportements en fonction de la qualité de l'automatisation :

- Confiance appropriée : l'opérateur fait confiance à l'automatisation et l'utilise lorsqu'elle est de bonne qualité ;
- Méfiance appropriée : l'opérateur ne se fie pas à l'automatisation et la rejette de par sa piètre qualité ;
- Méfiance erronée : l'opérateur ne fait pas confiance et rejette un automate pourtant de bonne qualité ;
- Confiance erronée : l'opérateur fait confiance et utilise une automatisation pourtant de piètre qualité.

Les deux niveaux *confiance appropriée* et *méfiance appropriée* sont ceux dans lesquels la confiance envers la machine est bien adaptée. Ces situations correspondent donc à une bonne calibration, c'est-à-dire à une relation d'équilibre entre les capacités de l'automatisation et la confiance d'un individu dans cette automatisation (Lee *et al.*, 1992). Une mauvaise calibration correspond à deux phénomènes qui sont la surconfiance et la sous-confiance (Lee *et al.*, 2004, p.55). La surconfiance correspond à une confiance trop élevée par

rapport aux capacités de l'automatisation, alors que la sous-confiance fait référence à une faible confiance dans les capacités de l'automatisation. Une meilleure connaissance de la calibration entre capacités objectives du système de conduite automatisée et capacités attribuées subjectivement à ce système est un élément important de la sécurité du futur véhicule (Moessinger, Kassaagi, Meyer, Delhomme, Valot, & Ragot, 2006, p.108).

Il existe différents leviers permettant d'augmenter ou de diminuer la confiance dans un système automatisé. Un des enjeux de la conduite automatisée est de construire une relation de confiance bien adaptée. La question qui se pose est donc de savoir comment atteindre une bonne calibration. Plusieurs résultats de recherche permettent de trouver des pistes de réflexion.

Tout d'abord, l'étape initiale de la confiance dans un système est l'expérience par essais et erreurs qui offre l'opportunité de se familiariser avec l'autre élément du système, en l'occurrence l'automate (Hoc, 2001). Ensuite, plus un opérateur comprend le fonctionnement d'un système plus sa confiance augmentera à l'égard de ce système. Cependant, un système automatisé commettant des erreurs perd en fiabilité aux yeux de l'utilisateur, ce qui diminue la confiance qu'il lui porte (Dzindolet, Peterson, Pomransky, Pierce, & Beck, 2003). Cette observation est contestée par l'étude sur piste fermée de Rudin-Brown *et al.* (2004), dans laquelle la confiance des participants dans le régulateur de vitesse adaptatif (ACC) a augmenté avec la pratique, et n'a pas été affectée négativement par les échecs du système. Les automobilistes ont confié via une interview post expérience qu'ils ont compté sur le système ACC pour maintenir leur vitesse et les inter-distances entre véhicules. Ces études mettent en évidence un lien entre la fiabilité d'un système et la confiance, qui peut être positif ou négatif. A contrario, dans une étude de Stanton *et al.* (2005), la confiance dans l'ACC n'est pas affectée par la quantité de feedback donnée au conducteur ni par la densité du trafic dans laquelle le dispositif est utilisé. Il n'y a pas de relation significative entre la fiabilité du

système et la confiance. Il ressort de ces études que l'utilisation d'une ADAS peut impacter (positivement ou négativement) ou non la confiance dans cette aide. La relation entre la fiabilité d'un système et la confiance qui lui est attribuée n'est pas claire. De fait, il semble aujourd'hui difficile de prédire la confiance qu'auront des automobilistes non professionnels dans un véhicule complètement automatisé tant qu'ils ne l'auront pas essayé, idéalement sur route.

Le modèle général de l'initiative mixte des systèmes homme-machine de Riley (1989) partage plusieurs caractéristiques avec le modèle de Muir. Il prédit que les opérateurs mettent plus de temps à bâtir une relation de confiance qu'à la détruire. Qui plus est, l'opinion générale que se fait l'opérateur sur l'automatisation sera moins sensible au changement au fur et à mesure que son expérience avec le dispositif augmente. Une autre étude de Muir et Moray (1996), simulant le contrôle d'une usine de pasteurisation de lait, a révélé que la confiance subjective d'opérateurs dans un système automatisé pourrait être un prédicteur quantitatif fiable de l'adaptation du comportement : plus ils ont confiance, moins ils vont interagir avec le système (corrélation négative). La deuxième implication, mise en relation avec l'automobile est que, si un automobiliste fait confiance à un dispositif, il le supervisera moins, ce qui peut entraîner une baisse de la vigilance, et une surconfiance dans le système à même de nuire au maintien des niveaux d'alerte et d'orientation. Ensuite, la confiance dans l'automatisation augmente avec son utilisation, si le dispositif est considéré comme fiable par l'utilisateur. Si l'utilisation prolongée entraîne la confiance à l'égard du système, cette confiance amène à une diminution de la supervision du dispositif automatisé, diminution qui peut être potentiellement à l'origine d'une baisse de l'attention, impliquant une baisse des ressources allouées à la tâche, et donc un risque de sous-charge cognitive (Stanton *et al.*, 1997).

Les automobilistes se perçoivent comme capables d'utiliser un système d'aide à l'inter-distance (SID), y compris lorsqu'il présente des signes manifestes de déficience. Cette absence de différences traduit une appropriation de l'aide considérée comme maîtrisable quelle que soit sa fiabilité (Moessing *et al.*, 2006, p.107). Cette observation est congruente avec une étude sur simulateur (Bjørkly, Jenssen, Moen, & Vaa, 2003), qui met en évidence que le freinage brusque et le désengagement précipité de l'ACC par les automobilistes est corrélé avec la méfiance envers la technologie. Toutefois, l'acceptabilité subjective du système est plus élevée après l'avoir essayé. Ces résultats ne sont pas similaires à ceux observés par, entre autres, Stanton *et al.* (2005) et Muir *et al.* (1996). En effet, si les automobilistes n'ont jamais essayé d'ADAS, ils n'utiliseront l'ACC et le contrôle de la trajectoire (Auto-steering, AS) que pour des situations dans lesquelles ces dispositifs ont fait leurs preuves. Si les aides ont échoué à prouver leur efficacité, les automobilistes pourraient bien ne jamais les utiliser. Ainsi, l'impact du degré de confiance sur l'intention d'utilisation d'ADAS est variable.

Les difficultés rencontrées lors des reprises de contrôle manuel (RCM) pourraient être expliquées par la complaisance car les conducteurs comptent sur le système pour qu'il prenne en charge les tâches de conduite qu'ils réaliseraient habituellement (Stanton *et al.* 2001 ; Young *et al.*, 2007). La complaisance est *un état psychologique caractérisé par un faible index de suspicion* (Wiener, 1981, p.119), bien qu'il n'y ait pas de consensus à propos de la définition de ce concept (Parasuraman & Manzey, 2010). La complaisance pourrait se traduire par des comportements tels que l'absence de supervision d'un système, qui reflèterait l'absence de besoin de contrôle. La surconfiance pourrait être un artefact de la complaisance et est potentiellement un problème majeur pour réaliser une RCM quand la CCA est activée. Si les conducteurs comptent entièrement sur le système automatisé pour conduire leur véhicule, ils pourraient ne pas s'attendre à avoir à reprendre le contrôle rapidement (dans une

situation d'urgence), ce qui pourrait entraîner de plus longues latences lorsque l'intervention humaine est requise. Cela est cohérent avec l'hypothèse selon laquelle un système homme-machine peut être amélioré si la confiance qui lui est accordée est appropriée (Wickens, Gempler, & Morphew, 2000), c'est-à-dire si la surconfiance et la sous-confiance sont évitées. Plus encore, étant donné que la complaisance pourrait affecter la sécurité des conducteurs lorsqu'ils font excessivement confiance à un régulateur de vitesse adaptatif (Inagaki & Furukawa, 2004), nous avons choisi d'investiguer ce phénomène dans nos études.

De manière générale, la question de l'influence de la confiance sur l'utilisation d'un véhicule complètement automatisé semble se poser légitimement. Il serait également intéressant de savoir si la confiance peut être influencée par la manière dont cette conduite est expliquée. La confiance à l'égard de l'automatisation peut également se construire en partie avec la *méta-confiance*, définie comme *la confiance qu'une personne a que la confiance d'une autre personne dans l'automatisation est appropriée* (Lee *et al.*, 2004). Peut-on apprendre à faire confiance ? La confiance qu'un individu accorde à un système d'aide dépend de la performance perçue de ce système, de sa fiabilité (Maltz, Sun, Wu, & Mourant, 2004 ; Moray, Inagaki, & Itoh, 2000 ; Riley, 1994). La fiabilité d'un système peut être estimée en l'utilisant ou en connaissant ses principes de fonctionnement. Or, plus un opérateur comprend le fonctionnement d'un système automatisé, plus sa confiance augmentera à l'égard de ce système (Dzindolet *et al.*, 2003). De fait, la confiance à l'égard de la CCA pourrait donc être augmentée si les automobilistes obtiennent des explications sur son fonctionnement, par exemple lors d'une session d'apprentissage théorique sur les capacités du système.

4. Apprentissage et pratique de la conduite complètement automatisée

4.1. Introduction

La recherche n'a pas encore approfondi les processus d'apprentissage de la conduite automatisée, notamment sur les effets à long terme des aides à la conduite évoluées (Saad *et al.*, 2004). Les études qui traitent de l'apprentissage du fonctionnement d'aides à la conduite portent essentiellement sur les régulateurs de vitesse adaptatifs (ACC ; voir Saad *et al.*, 2004). Le contexte de conduite est souvent celui du dépassement d'autres véhicules, avec la notion de reprise de contrôle de la vitesse du véhicule.

La transition du contrôle humain-machine dans un système automatisé est un élément primordial de l'amélioration de la sécurité routière si les conducteurs ne sont pas complètement entraînés (Inagaki, 2006). Brookhuis et de Waard (2006) ainsi que Hoc *et al.* (2009) ont suggéré qu'un entraînement spécifique devrait être envisagé pour assister les conducteurs à reprendre le contrôle manuel de manière sûre. Des suggestions similaires ont été faites concernant l'effet positif de l'entraînement pour éviter des crashes avec des avions équipés d'autopilotes (McClellan, 1994). Introduire la CCA à des conducteurs non-professionnels en leur faisant pratiquer de nouvelles manœuvres telles qu'enclencher le mode automatisé et reprendre le contrôle pourrait les aider lors de l'utilisation d'un tel système pour la première fois.

Kopf et Nirschl (1997) ont comparé l'apprentissage de trois types d'ACC différents. La puissance de décélération variait entre faible, moyenne et importante, tout comme l'inter-distance avec le véhicule de devant qui pouvait être configurée avec plus ou moins de marge. Ces systèmes ont tous été essayés sur piste par chacun des participants sur cinq essais de 130km pour une durée de session d'environ une heure et quart. Les premiers résultats révèlent que les automobilistes sont capables d'intégrer le comportement du système car la charge de

travail ainsi que la fréquence des interventions diminuent avec l'expérience. Les auteurs recommandent d'accélérer le processus d'apprentissage de ces systèmes en aidant les automobilistes à prédire le comportement du système, en l'occurrence l'ACC. Deux à trois semaines seraient nécessaires pour apprendre à utiliser un ACC et évaluer son comportement lors de dépassement, d'après le comportement des automobilistes et leur auto-évaluation de la durée d'apprentissage (Weinberger, Winner, & Bubb, 2001). Dans le cadre de l'utilisation d'une voiture complètement automatisée, expliquer aux automobilistes la logique de fonctionnement du système pourrait accélérer le processus d'apprentissage.

Les termes d'*apprenabilité* (learnability) et d'*évidence* (self-explanatory) des systèmes d'aide à la conduite ont été introduits par Manstetten, Krautter, Engeln, Zahn, Simon, Kuhn *et al.* (2003) : *un système est apprenable s'il y a assimilation précise des informations par l'automobiliste, assimilation prouvée par la compréhension des fonctions du système, de sa prise en main et de la connaissance de ses limites*. Un système d'aide à la conduite évident est défini comme étant capable *de n'exiger qu'une demande minime en termes d'apprentissage à l'automobiliste et d'éliminer les problèmes d'apprenabilité qui peuvent se produire dans situations de conduite dangereuse*. Ces deux dimensions sont similaires à deux des cinq dimensions qui constituent l'utilisabilité, à savoir la facilité d'utilisation et la mémorisation. Cependant, l'étude de Manstetten *et al.* n'a pas donné de détails explicites sur le contenu de l'apprentissage de la conduite automatisée. Plusieurs études ont insisté sur le besoin d'optimiser les étapes d'apprentissage de la conduite automatisée (Saad, *et al.*, 2004).

4.2. Expérience et aide à la conduite

Les études sur l'utilisation de système de régulation de vitesse ou d'ACC indiquent que, de manière générale, les automobilistes réagissent plus tardivement ou réduisent les marges de sécurité lorsqu'ils sont assistés par ce type de système. Tout d'abord, les temps de réaction sont plus lents lorsqu'ils utilisent des régulateurs de vitesse intelligents (Intelligent Cruise Control, ICC) (Nilsson & Nabo, 1996). Ensuite, lors d'une situation de freinage d'urgence manuel alors que l'ACC était enclenché, Hoedemaeker *et al.* (1998) constatent que la distance de freinage est plus grande, et l'inter-distance avec le véhicule juste devant est réduite. Dans le même type de situation où, sur piste, 18 automobilistes expérimentés (ayant le permis de conduire depuis au moins 5 ans, conduisant régulièrement et utilisant un régulateur de vitesse standard) devaient reprendre le contrôle manuel du véhicule alors que l'ACC était engagé, les réactions des automobilistes étaient plus lentes et les marges de sécurité moins respectées que lorsque ce dispositif n'était pas utilisé (Rudin-Brown *et al.*, 2004). En outre, lorsque le système avait failli, les automobilistes ne réagissaient que lorsque la distance avec le véhicule de devant était très réduite (temps de réaction compris entre 16.8 et 34.4 s).

Dans l'expérience de Nilsson sur simulateur de conduite (1995), 10 participants s'approchaient d'une file de véhicules stationnés alors que l'ACC était engagé ; le dispositif ne prenait pas en charge l'arrêt total du véhicule et, de fait, les individus devaient freiner eux-mêmes. 4 participants sur 10 entraient en collision avec les véhicules immobiles car les temps de réaction étaient trop longs. L'auteur explique ces incidents par le fait que les automobilistes pensaient que l'ACC était en mesure de gérer cette situation sans qu'ils interviennent. L'expérience de Stanton *et al.* présente des conditions analogues, à la différence près que le participant à bord de la voiture dont l'ACC était engagé accélérât à l'approche d'un véhicule plus lent. Le système commettait ici une erreur. Un tiers des

participants (4 sur 12) n'a pas repris le contrôle longitudinal du véhicule et est entré en collision avec le véhicule de devant. L'explication avancée ici est qu'il y aurait un lien entre la charge mentale et la faculté des automobilistes à reprendre le contrôle de leur véhicule précipitamment. En ce qui concerne le transfert d'apprentissage, l'expérience avec un régulateur de vitesse améliore la vitesse de réponse des automobilistes utilisant des voitures hautement automatisées, par rapport à ceux n'ayant pas d'expérience avec des aides à la conduite (Larsson, Kircher, & Hultgren, 2014). D'autres résultats montrent qu'il faut plus de temps pour reprendre le contrôle du véhicule lorsque la conduite est hautement automatisée (niveau 3) que lorsqu'elle n'est qu'assistée par des aides (Gold, Damböck, Bengler, & Lorenz, 2013). La pratique d'un système de conduite partiellement automatisé pourrait donc améliorer l'utilisation d'un système similaire avec un degré d'automatisation plus élevé. Toutefois, l'expérience nécessaire ainsi que la durée des effets produits restent à déterminer.

Le fil rouge des résultats de ces expériences est que lorsque le contrôle longitudinal (accélération et freinage), et dans certains cas le contrôle latéral (i.e. direction), sont assurés par une aide à la conduite, les temps de réaction en cas de changement de situation de conduite sont accrus. Cette latence pourrait être liée à une baisse de l'attention et/ou à une surconfiance dans le système. Il est à noter que les temps de réaction sont rarement donnés explicitement dans les études, et qu'ils concernent souvent l'action de freinage. Toutefois, ces résultats s'inscrivent dans une pratique de l'ACC à court terme, les automobilistes n'ayant pas pu l'utiliser sur des durées longues, et dans des conditions de trafic différentes. Il serait intéressant de prolonger l'utilisation de tels dispositifs en variant la durée d'apprentissage et en diversifiant les contextes d'utilisation (trafic, panne, conditions météorologiques, etc.). Par exemple, Kopf *et al.* (1997) ont testé l'apprentissage de trois versions de l'ACC qui différaient selon leur capacité de décélération. Il s'avère que la charge de travail diminue progressivement lorsque l'automobiliste acquiert de plus en plus d'expérience avec le système

utilisé. En effet, les effets positifs de l'apprentissage sur la conduite manuelle peuvent s'estomper avec le temps, notamment parce que les automobilistes oublient ou ne sont plus motivés pour faire perdurer les aspects d'un style de conduite (Johansson, Gustafsson, Henke, & Rosengren, 2003; af Wåhlberg, 2007).

Saad *et al.* (2004) considèrent qu'il y aura potentiellement deux types d'utilisation de la conduite déléguée. La première serait une utilisation du système comme *outil référent*, c'est-à-dire que les automobilistes s'en serviraient comme une aide afin d'améliorer et optimiser les conditions de leur trajet (Shinar & Schechtman, 2002). La deuxième serait une utilisation qu'on pourrait appeler détournée ou *esclave*, dans laquelle l'automobiliste se servirait des aides pour vaquer à d'autres occupations dans le véhicule. L'utilisation *esclave* peut servir à compenser certaines limites de l'automobiliste et expérimenter une conduite plus grisante (Hoedemaeker, 1999).

4.3. Comment apprendre à conduire une voiture complètement automatisée ?

Les prototypes de véhicules complètement automatisés sont très difficilement disponibles pour expérimenter. Une alternative sûre et possible est d'utiliser la simulation pour faire interagir des automobilistes avec cette technologie. Les simulateurs de conduite interactifs et les programmes informatiques sont des outils potentiellement efficaces pour l'entraînement à la conduite (De Groot, Ricote, & Winter, 2012), et sont couramment utilisés. Un autre avantage est qu'il est possible dans cet environnement de faire tester aux automobilistes les limites du système et de leurs capacités à l'utiliser sans les mettre en danger. Ce genre de situations dégradées vécues par les automobilistes peut contribuer à l'apprentissage à long terme de compétences motrices et de connaissances. Toutefois, des études sur l'apprentissage et la familiarisation à la conduite partiellement automatisée ont pu être menées et constituent un bon début de réflexion.

L'expérience sur piste de Kopf et Simon (2001) visait à étudier les différentes manières de reprendre le contrôle du véhicule lors d'un dépassement d'un autre véhicule, lorsque l'ACC est engagé. Ils ont pu en extraire une taxonomie des étapes d'apprentissage de l'ACC :

- la phase préliminaire, dans laquelle l'opérateur découvre le système (apprentissage de sa mise en marche) ;
- la phase de test, dans laquelle les limites du système sont éprouvées ;
- la phase de familiarisation, dans laquelle l'automobiliste apprend à utiliser le système en fonction des particularités de l'environnement.

Les participants ont tendance à tester les limites du système lors de leur première utilisation, comme en témoignent les nombreux freinages forts qu'ils effectuent durant cette période. S'ensuit une certaine appréhension quant aux capacités du système, puis un usage plus personnalisé et stable de celui-ci. Le nombre de fois où l'automobiliste désactive le système en appuyant sur le bouton *on/off* augmente à mesure que sa capacité à prédire les situations augmente (3 automobilistes sur 5). L'expérience avec le système permettrait une meilleure conscience de la situation.

Stanton *et al.* (2005) donnent également des recommandations sur l'apprentissage et l'entraînement à la conduite, notamment lorsque les automobilistes ont l'opportunité d'utiliser des aides à la conduite de type ACC. Ils partent du principe que les individus avec un locus de contrôle externe sont moins prudents, moins attentifs et plus enclins à être impliqués dans des accidents que des individus avec un locus de contrôle interne, en ce qui concerne la conduite manuelle (Montag *et al.*, 1987 ; Lajunen & Summala, 1995). Ce phénomène pourrait être accentué par l'automatisation, qui peut entraîner la surconfiance dans le système. Dès lors, il serait bénéfique de sensibiliser les individus ayant un locus de contrôle externes au style interne, qui est plus sûr.

Il est primordial de raccourcir les phases d'apprentissage du fonctionnement du système. Cela passe par deux recommandations. La première, c'est d'aider l'automobiliste à pouvoir faire des prédictions sur le comportement du système d'aide (ACC, AS). La deuxième, d'ordre plus général, consiste à aider l'automobiliste à se construire un modèle approprié du comportement du système (Kopf *et al.*, 1997, 2001 ; Weinberger *et al.*, 2001 cité par Saad *et al.*, 2004). Dans des conditions de conduite réelles, les 15 participants de l'expérience de Weinberger *et al.* (2001) estiment après quatre semaines d'utilisation qu'il a fallu deux semaines pour apprendre à utiliser correctement le modèle d'ACC équipé sur leur véhicule. Les auteurs estiment que cette phase peut durer entre deux et trois semaines. Cependant, ils insistent sur le fait que les participants ont conduit en moyenne 1400km par semaine, alors que l'automobiliste moyen de la population étudiée en parcourt environ 270, ce qui pourrait signifier qu'il faudrait plus temps au conducteur pour apprendre à utiliser cette technologie. D'après Sahami et Sayed (2010), les participants d'une expérience sur simulateur de conduite ont besoin d'un temps de familiarisation pour transférer leurs compétences de conduite dans un simulateur. Ce genre d'adaptation nécessite trois choses :

- le transfert des compétences cognitivo-motrices, c'est-à-dire la capacité à manipuler les dispositifs d'activation de navigation du véhicule ;
- le transfert des capacités mentales et cognitives nécessaires pour manœuvrer correctement et réagir à l'environnement simulé ;
- un bon réalisme du simulateur vis-à-vis des sensations de conduite.

L'apprentissage de la conduite automatisée devrait sensibiliser les utilisateurs à ce qu'il est possible de faire ou non lorsque le pilotage automatique est actif. En effet, si l'automobiliste doit pouvoir reprendre le contrôle manuel du véhicule à tout moment, est-il raisonnable, par exemple, de boire un café chaud ou de prendre dans ses bras un enfant ? Par ailleurs, si l'automobiliste est engagé dans une tâche très prenante cognitivement, par exemple

rédiger un email professionnel, sera-t-il en mesure de reprendre le contrôle manuel si cela est nécessaire ? Si oui, dans quelles conditions réalisera-t-il cette nouvelle manœuvre ?

Afin de hiérarchiser et décomposer les manœuvres, parfois nouvelles, impliquées par la CCA, il semble pertinent de les présenter au conducteur en fonction de leur ordre logique, mais également de leur difficulté. Ainsi, une première interaction avec le système consisterait à enclencher la CCA puis à reprendre le contrôle manuel de manière anticipée, c'est-à-dire lorsque l'opérateur est prévenu suffisamment à l'avance du moment où la reprise de contrôle est nécessaire. Les interactions plus complexes d'un point de vue cognitif et moteur pourraient être abordées dans un deuxième temps. On pense ici aux reprises de contrôle urgentes et volontaires. Les reprises de contrôle urgentes concernent la sollicitation subite et inopinée de l'automobiliste, parfois inattentif, pour reprendre le contrôle du véhicule. En outre, l'opérateur est potentiellement en train de réaliser une autre tâche encombrante au moment où il est sollicité, ce qui peut entraver d'un point de vue moteur (gestes, postures) la reprise de contrôle. Enfin, les reprises de contrôle volontaires peuvent être complexes dans la mesure où elles peuvent être effectuées en virage.

Selon Rogalski (2004), l'activité d'entraîner, *de faire apprendre*, est un processus dynamique, une activité didactique tout comme une activité professionnelle. Avant de se prononcer sur la nécessité de professionnaliser l'enseignement de la CCA, il convient d'identifier les nouvelles connaissances à assimiler selon les tâches à réaliser. Ensuite, en fonction des observations relevées, il sera possible de dire s'il est nécessaire de systématiser cette formation en la rendant éventuellement obligatoire. Le processus dynamique d'entraînement correspond à l'acquisition de connaissances, la manipulation des commandes, et aux interactions de l'automobiliste dans le véhicule. Mettre en marche le système, reprendre le contrôle manuel mais aussi le comportement à adopter lorsque le système est en pilotage automatique sont autant de processus qui dépendent de l'environnement ainsi que de

l'état psycho-physiologique de l'opérateur. Ainsi, pour contrôler ces savoir-faire et ces savoir-être, il semble raisonnable d'allier la pratique à une formation théorique. La pratique correspond à l'exécution de nouvelles manœuvres introduites par ce type de conduite ; la théorie renvoie aux connaissances que les automobilistes se doivent de posséder sur la CCA afin de saisir quel est son potentiel mais aussi ses limites. La formation à la CCA pourrait donc consister à entraîner les automobilistes en leur faisant pratiquer des manœuvres, à répéter ces manœuvres, mais également à leur donner des outils permettant de comprendre quels sont les comportements à adopter afin de pallier d'éventuelles situations dangereuses. La validation de la formation consisterait à vérifier que les automobilistes ont bien compris et intégré les nouveautés présentées à partir d'exercices pratiques et théoriques.

4.4. Méthode d'apprentissage à la conduite complètement automatisée

La première étape pourrait consister à expliquer les principes généraux de la conduite automatisée, c'est-à-dire exposer de manière simple et concise sa fonction et son principe d'utilisation. La question centrale est la suivante : qu'est-ce que la conduite complètement automatisée ? Il faudrait expliciter le potentiel et les limites de cette technologie, c'est-à-dire délimiter un cadre d'utilisation. Pour opérationnaliser cet apprentissage, nous introduisons le concept d'apprentissage par l'instruction. L'apprentissage par l'instruction peut se faire par la lecture de texte. Cet apprentissage passe par la compréhension de textes de deux types différents. Soit ils sont centrés sur l'acquisition de connaissances, soit ils sont pragmatiques, c'est-à-dire qu'ils renseignent sur la réalisation d'une action. On s'intéressera ici aux textes permettant l'acquisition de connaissances (Weil-Barais, 2005, p.494-495) pour apprendre les principes et la logique de fonctionnement de la conduite complètement automatisée.

La deuxième étape pourrait être de montrer comment utiliser la conduite complètement automatisée en proposant des vidéos pédagogiques aux conducteurs qui ne connaissent pas cette technologie. La vidéo a deux principaux avantages. Le premier est

qu'elle suggère l'imitation de comportements, qui désigne *la correspondance entre le comportement de deux individus, lorsque cette correspondance résulte de la possibilité qu'a l'un deux (celui qui imite) d'observer le comportement de l'autre* (Winnykamen, 1990, p.12).

C'est une reproduction exacte des actions du modèle. Le deuxième, similaire, est que le support vidéo favorise l'apprentissage par observation, ou apprentissage vicariant (Bandura, 1967). L'apprentissage vicariant est l'observation d'une séquence d'événements concernant un modèle, qui entraîne une modification des réponses de l'observateur. Cette modification est réalisée en l'absence du modèle. Une fois que la vidéo aura été visionnée, les conducteurs pourraient modifier leur comportement dans une situation donnée, en fonction de ce qu'ils ont déjà vu.

Enfin, un enjeu majeur de la CCA est d'optimiser l'interaction homme-machine pour assurer la sécurité du conducteur, des passagers, des piétons et des autres automobilistes. Dans le cadre de la CCA, il y a coopération entre l'automobiliste et le véhicule complètement automatisé. En effet, pour assurer le bon déroulement de la conduite, il faut que les deux agents assurent les deux transitions possibles dans le contrôle du véhicule. Ces deux transitions sont la délégation de la conduite au pilote automatique, et la RCM. Ces transitions peuvent être anticipées (début de zone autorisée à la CCA et volonté de l'automobiliste de déléguer la conduite), mais également urgentes (dysfonctionnement du système). Le troisième type de transition est volontaire, c'est-à-dire que l'opérateur décide du moment où il reprend le contrôle manuel du véhicule. La RCM volontaire peut-être provoquée par la volonté de retrouver du plaisir de conduire ou parce que la CCA n'est plus considérée comme suffisamment fiable par l'opérateur (marquage au sol dégradé, conditions météorologiques défavorables, etc.). La RCM pourrait être la manœuvre au cœur d'une méthode d'entraînement. Cette manœuvre pourrait être apprise en la pratiquant. En effet, on parle d'apprentissage par l'action quand l'acquisition des connaissances peut être attribuée à

l'action du participant. L'action d'un individu peut être renforcée par un événement. Par exemple, le conditionnement instrumental est une forme d'apprentissage par l'action. L'action est en soi une source de connaissance d'après Piaget (1967). L'apprentissage par l'action fait référence à la mémoire procédurale, qui est impliquée dans l'apprentissage d'habiletés et de comportements (Schacter & Tulving, 1994).

5. Compétences connaissances de conduite automatisée

5.1. Nouvelles compétences et connaissances sollicitées par la conduite complètement automatisée

Les compétences et connaissances de la conduite manuelle se décomposent en quatre niveaux d'après la matrice GDE (Hatakka *et al.*, 2002) (Tableau 10). Cette grille d'analyse pourrait être adaptée à la CCA en trois grandes catégories prenant en compte les nouvelles situations de conduite introduite par cette technologie : les savoir-faire, les savoir être et les savoir-coopérer.

Tableau 10 : Matrice GDE, Assailly (2007)

Niveau hiérarchique du comportement	Contenu de l'éducation du conducteur		
	Connaissances et compétences	Facteurs d'accroissement du risque	Auto évaluation
Projets de vie et aptitudes	Connaissances pour appréhender/maitriser comment les projets généraux de vie et les valeurs, le style de comportement, les normes de groupe etc. affectent la conduite automobile.	Connaissances pour appréhender/maitriser les risques liés aux projets de vie et aux valeurs, au style de comportement, à la pression sociale, à l'abus de drogues etc.	Conscience de ses tendances personnelles concernant le contrôle des impulsions, les motivations, le style de vie, les valeurs, etc.
Objectifs et contexte de la conduite	Connaissances et compétences concernant les éléments relatifs au déplacement (effet des objectifs, choix de l'environnement, effets de la pression sociale, évaluation des contraintes, etc.).	Connaissances et compétences concernant les risques liés aux objectifs du déplacement, au contexte de conduite, à la pression sociale, aux buts de la conduite, etc.	Conscience des facteurs personnels concernant les compétences de planification des déplacements, les objectifs spécifiques de la conduite, les motivations, etc. Développement de l'auto-évaluation
Maitrise des situations de circulation	Connaissances et compétences générales concernant les règles, l'adaptation de la vitesse, les marges de sécurité, la signalisation, etc.	Connaissances et compétences concernant la vitesse inappropriée, les faibles marges de sécurité, le non-respect des règles, les conditions de circulation difficiles, les usagers vulnérables, etc.	Conscience des facteurs personnels concernant les compétences, le style de conduite, la perception des risques du point de vue des forces et des faiblesses
Maniement du véhicule	Connaissances et compétences élémentaires concernant le maniement, les caractéristiques, l'adhérence du véhicule.	Connaissances et compétences des risques relatifs au maniement, aux caractéristiques, à l'adhérence du véhicule, etc.	Conscience des forces et faiblesses personnelles concernant les compétences élémentaires de conduite, la maîtrise du véhicule dans des situations dangereuses

5.1.1. *Savoir-faire*

Le premier niveau de la matrice correspond au maniement du véhicule. Pour la CCA, on peut considérer au moins deux nouvelles manœuvres que sont l'activation du pilotage automatique et la RCM. L'activation du pilotage automatique est la manœuvre par laquelle l'automobiliste délègue la conduite au système informatique du véhicule en utilisant une commande (vocale, pression sur un bouton, position des mains et des pieds, etc.). La RCM est la transition assurée par l'automobiliste entre le mode de pilotage automatique et le mode de pilotage manuel. Elle implique de se remettre en posture de conduite (mains sur le volant, pieds sur les pédales, regard sur la route, posture assise, être face au volant avec la ceinture de sécurité), et de maîtriser le véhicule (contrôle latéral et longitudinal). Cette manœuvre pourrait être analysée selon des critères qualitatifs, comme le contrôle latéral, la régularité de la vitesse, ou la précision dans l'utilisation des commandes, mais aussi selon des critères quantitatifs comme le temps de réponse nécessaire pour reprendre le contrôle manuel. Des connaissances techniques sur le fonctionnement du système de CCA peuvent également être incluses dans ce niveau, notamment sur son potentiel et ses limites, et plus généralement sa logique de fonctionnement.

Le deuxième niveau de la matrice concerne la maîtrise des situations de circulation (autoroute, ville, congestion ou fluidité du trafic etc.). Les conditions dans lesquelles le pilotage automatisé pourra être utilisé ne sont pas encore clairement définies. Toutefois, il est envisageable que des zones dédiées à cette conduite soient mises en place et que le protocole d'activation reste similaire d'une situation à l'autre. Il n'en sera vraisemblablement pas de même pour la RCM. En effet, la vitesse, la congestion, le tracé de la route (rectiligne, en courbe) et son état (enneigée, humide, sèche etc.) pourrait avoir une influence sur cette manœuvre. De plus, les RCM pourraient être soit anticipées, c'est-à-dire que l'automobiliste serait prévenu en avance qu'il doit reprendre la main, soit inattendues, notamment lorsque le

système serait incapable de gérer une situation (zone en travaux, routes abîmées, policier faisant la circulation, défaillance du système etc.). Ainsi, il semble pertinent d'analyser et de comparer la reprise de contrôle manuel en fonction de différentes situations de trafic. Ce niveau comprend à la fois des compétences manuelles de la CCA mais aussi des connaissances pour pouvoir l'utiliser dans des conditions optimales.

Ces deux premiers niveaux de la matrice GDE concernent les aspects physiologiques et psychomoteurs de la conduite manuelle, qui s'appliquent aussi à la conduite complètement automatisée. Des connaissances techniques du véhicule et des règles de circulation sont également incluses dans ces niveaux. L'acquisition de ces savoir-faire permettrait la mise en œuvre de ces compétences dans des contextes différents.

5.1.2. *Savoir-être*

Les savoir-être incluent deux dimensions évoquées précédemment : l'acceptabilité et la confiance. L'acceptabilité permet de savoir dans quelle mesure les automobilistes souhaiteraient utiliser cette technologie. Mais peuvent-ils l'utiliser partout et en toutes situations ? Par exemple, il ne semble pas concevable que les automobilistes n'étant pas en état de conduire manuellement (fatigue, consommation de substances psychoactives, motricité et perception réduites, etc.) soient autorisés à utiliser un véhicule complètement automatisé. Evaluer l'acceptabilité de cette conduite devrait aussi prendre en compte la notion de responsabilité. Cependant, au regard du vide juridique entourant cette technologie et de l'incertitude concernant les caractéristiques précises des véhicules complètement automatisés, il est difficile de trancher quant à la responsabilité des parties en cas d'incidents (Guilbot, 2014). En outre, la calibration de la confiance ferait partie du savoir-être, dans la mesure où une confiance proportionnelle aux capacités du système optimiserait la performance homme-machine. Enfin, l'auto-évaluation des capacités de conduite et le jugement porté aux utilisateurs d'aides à la conduite, souvent négatif (Lefevre *et al.*, 2008), pourraient influencer

l'intention d'utilisation et l'utilisation même de la conduite complètement automatisée. Les objectifs et le contexte de la conduite, dans lequel l'automobiliste décide pourquoi, où, avec qui, et quand conduire seraient également inclus dans le troisième niveau. Enfin, le savoir-être inclurait le quatrième niveau de la matrice, à savoir projets de vie et aptitudes, car il fait référence aux motivations et buts d'un individu dans un sens large (Keskinen, 1996), ainsi qu'aux compétences de chacun pour gérer les différentes situations de la vie.

La prévention routière appliquée à la conduite complètement automatisée contribuerait au développement du savoir-être des automobilistes. Bien qu'il ne soit pas possible de savoir à l'heure actuelle comment cette technologie pourra être utilisée par tous, il apparaît important de sensibiliser les futurs utilisateurs aux comportements et attitudes pouvant entraver l'usage sûr de la conduite complètement automatisée.

5.1.3. *Savoir-coopérer*

Le savoir-coopérer est une composante de l'interaction homme-machine qui est composée de deux stades (Milot *et al.*, 1998) : le premier est la gestion des interactions avec les tâches de l'autre agent ; le second est la réalisation de ses propres tâches en considérant les activités de l'autre agent pour rendre son travail plus aisé. Le premier stade consiste à éviter les conflits entre les agents, c'est-à-dire détecter et gérer des interférences. Les échanges d'informations sont au cœur de ce stade. Par exemple, le retour d'information est un élément essentiel à la compréhension de l'état du système par l'automobiliste, notamment pour savoir qui a le contrôle sur la conduite. L'automobiliste peut également être une source d'informations, par exemple via les dispositifs de géolocalisation ou encore de monitoring du visage (par exemple le système DSM).

Le deuxième stade est celui de la facilitation de la tâche réalisée de chacun des agents pour l'autre. Par exemple, la CCA va pouvoir gérer toutes sortes de situations de conduite sans que le conducteur n'ait besoin d'intervenir, lui permettant de s'engager dans une autre tâche

que conduire sans être interrompu. A l'inverse, le conducteur va faire en sorte de ne pas perturber le bon fonctionnement du système en intervenant, par exemple, de manière involontaire pour reprendre le contrôle de la conduite, bien que ce cas soit peu probable car certaines manipulations et postures spécifiques seraient nécessaires pour éviter ce genre de situation (obligation d'avoir les deux mains sur le volant et le pied sur l'accélérateur et/ou le frein pour reprendre le contrôle).

Dans le domaine de la CCA, il serait possible d'ajouter un troisième stade au savoir-coopérer homme-machine. Ce stade serait l'interaction bilatérale entre le véhicule automatisé et les autres usagers de la route. Les automobilistes dans d'autres véhicules que ceux étant complètement automatisés, ainsi que les autres usagers de la route, vont découvrir un comportement routier différent de celui d'un être humain. Il y aura en ce sens un savoir-coopérer à développer entre les différents automobilistes à bord de véhicules automatisés ou non sur la même route. Dans ce stade, c'est le point de vue des autres usagers de la route qui est pris en compte. Le premier stade sera plus particulièrement investigué dans cette thèse.

5.2. Perte des compétences et conduite automatisée

La perte de compétences a été identifiée aussi bien pour la conduite manuelle (af Wåhlberg, 2007) que pour la conduite partiellement automatisée (Parasuraman, 2000). Contrairement au domaine de l'aéronautique, ce phénomène n'a pas fait l'objet de beaucoup d'études dans le domaine de la CCA.

A partir de travaux, menés dans le domaine de l'aéronautique, Stanton *et al.* (1996) extrapolent quels pourraient être les avantages et inconvénients de l'automatisation partielle de la conduite. Les avantages qu'ils envisagent seraient la diminution de l'anxiété, une amélioration de la sécurité, et une dynamisation du marché de l'automobile. Les inconvénients correspondraient à des déficits quant à la fiabilité des équipements, au maintien des compétences de conduite et de l'entraînement, au design de l'interface homme-machine

favorisant l'induction d'erreur, et enfin la sur-dépendance au système automatisé. Les auteurs font un parallèle avec l'automatisation et la perte de compétences dans le domaine de l'aéronautique. En effet, les équipages doivent faire face au problème de maintien à niveau des compétences en désactivant de manière périodique le système de pilotage automatique. Cela permet de réactualiser les compétences de pilotage, mais aussi de casser l'ennui des vols longs courriers (Barley, 1990). Se réengager régulièrement dans la conduite manuelle pourrait permettre de pallier une éventuelle perte de compétences.

Les experts en aéronautique recommandent aux pilotes de voler en mode manuel autant que possible pour éviter la perte de compétences (Federal Aviation Association [FAA], 2013b). En effet, des difficultés pour reprendre le contrôle manuel ont été observées, telles que l'utilisation inadéquate des commandes de contrôles ou des difficultés à détecter une situation inhabituelle, décrites comme *un manque de maîtrise du contrôle manuel [...] après la désactivation de l'autopilote, dû dans certains cas à un manque de conscience de sa désactivation* (FAA, 2013a, p.1). La détérioration des compétences de pilotage d'avion concerne aussi bien les compétences des pilotes que leur connaissance technique de l'avion. Par ailleurs, cette connaissance peut varier d'un modèle à l'autre, et on ne peut savoir si la technologie de la voiture automatisée sera harmonisée pour tous les véhicules en étant doté. Une connaissance technique inadéquate et un entraînement insuffisant font partie des facteurs d'accident (op. cit.p.70).

Un consensus existe stipulant que l'automatisation pourrait entraîner une détérioration des compétences avec le temps, à un degré tel que les opérateurs ne seraient plus capables d'avoir la maîtrise du système lorsque cela devient nécessaire (Bainbridge 1983, Parasuraman 2000). Néanmoins, il a été démontré que l'automatisation pouvait réduire l'écart entre les compétences de conduite en permettant aux automobilistes novices de montrer une

performance relativement proche de celle d'experts (Shinar, Meir, & Ben-Shoham, 1998 ; Ward, 2000).

6. Les tâches non reliées à la conduite

La CCA pourrait donner l'opportunité aux conducteurs de s'engager dans d'autres activités que la conduite, souvent appelées tâches secondaires voire tâches de vie à bord, que la supervision du système soit obligatoire ou non. En effet, un niveau élevé d'automatisation (niveau 3 et plus de la grille NHTSA) favorise l'engagement dans d'autres tâches que la conduite lorsque le pilotage automatique est actif (De Winter *et al.*, 2014). Ces résultats invitent à investiguer les effets de la réalisation d'une autre tâche que la conduite en mode de pilotage automatique, notamment sur la RCM et donc sur la charge de travail mental. Les études examinant les effets des ADAS sur la charge mentale utilisent des tâches secondaires, dont les conséquences sur la performance de conduite divergent (Young, Brookhuis, Wickens, & Hancock, 2015). Lorsque le pilotage automatique est actif, la tâche non reliée à la conduite dans laquelle le conducteur s'engage devient tâche principale, et la conduite devient une tâche latente, c'est-à-dire une activité qui peut être reprise au gré de l'automobiliste ou en fonction des capacités du système. Cette tâche réalisée en parallèle de la conduite, elle-même gérée par le système, est une tâche que l'on considèrera comme principale et qui peut être de nature différente.

Il est difficilement concevable de ne rien faire pendant de longues périodes lorsque la CCA est active. Ainsi, lors d'une RCM, l'automobiliste sera vraisemblablement interrompu dans la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite (par exemple consulter ses emails, regarder un film, discuter, manger etc.), et devra reprendre le contrôle manuel du véhicule. Dans cette situation, la conduite manuelle correspondra donc à une activité nouvelle, d'autant plus que le temps passé en mode de pilotage automatique aura été long. Les conditions de circulation et la route pourront être différentes entre le moment où le pilotage automatique aura été activé et la reprise de contrôle, ce qui peut compliquer la RCM.

L'influence des ADAS sur les performances de conduite étant encore floue, il semble intéressant de mettre les automobilistes en situation de reprise de contrôle manuel lorsqu'une activité réaliste et complexe les oblige à adopter une posture qui n'est pas adéquate à la conduite (préhension d'un objet, croisement des pieds, déplacement des pieds sous le siège conducteur, inclinaison de la tête en dehors du champ de vision de la route etc.). Il serait également pertinent de mesurer l'impact d'une tâche exigeante du point de vue du traitement cognitif et de la posture de l'individu, ce qui a rarement été réalisé dans le domaine. Par exemple, la rédaction d'un email dans un cadre professionnel ou la résolution de problèmes exigent que les automobilistes manipulent des objets (stylo, tablette, téléphone), ne regardent pas la route, et focalisent leur attention sur la tâche en cours. Que se passe-t-il lorsqu'une RCM est nécessaire ? Il y a-t-il des différences lorsque cette RCM est réalisée de manière anticipée ou en situation d'urgence ? Les automobilistes vont probablement être confrontés à ces situations. Il est donc pertinent de les examiner et d'observer l'impact de la réalisation d'une tâche principale non reliée à la conduite sur la performance de RCM. Si cela a une influence négative, il convient de trouver une solution pour minimiser l'effet délétère d'une tâche principale non reliée à la conduite sur la reprise de contrôle manuel d'un véhicule complètement automatisé.

Chapitre IV :

Problématique

Chapitre IV : Problématique

Les niveaux d'automatisation des véhicules modernes sont de plus en plus élevés et le rôle de l'automobiliste est en train de changer progressivement (Damböck, Weißgerber, Kienle, & Bengler, 2012). Cela implique que, lorsque les véhicules complètement automatisés seront commercialisés, la sécurité routière dépendra grandement de la performance du système humain-machine, composé de l'automobiliste et de l'automate (Merat & Lee, 2012). Le changement des rôles de l'automobiliste, actif ou passif dans la manipulation des commandes du véhicule, engendre des modifications de son comportement, et ce en fonction du niveau d'automatisation (Flemisch, Schindler, Kelsch, Schieben, & Damböck, 2008 ; Peterman & Kiss, 2009) ainsi que du degré d'implication dans la tâche de conduite (Gold *et al.*, 2013).

Ainsi, les objectifs de cette thèse sont de comprendre dans quelle mesure les individus vont accepter d'utiliser cette technologie, de lui faire confiance et dans quelles conditions ils comptent l'utiliser, c'est-à-dire leurs intentions d'utilisation. Nous chercherons également à déterminer comment enseigner la conduite complètement automatisée à des automobilistes l'utilisant pour la première fois, et à définir le contenu de cet apprentissage. La transition du mode de pilotage automatique au mode de pilotage automatisée va être particulièrement examinée : c'est la notion de reprise de contrôle manuel du véhicule par l'automobiliste. Cette manœuvre est nouvelle, dans la mesure où le conducteur reprend le contrôle longitudinal et latéral du véhicule alors qu'il n'a ni les mains sur le volant, ni les pieds sur les pédales. Pour être réalisée efficacement, cette manœuvre nécessiterait un apprentissage, constitué d'une pratique et d'une partie théorique. La réalisation d'une tâche non reliée à la conduite pendant que le pilotage automatique est actif, la confiance et l'acceptabilité du système ainsi que les

interactions entre ces facteurs sont autant de dimensions pouvant impacter l'utilisation et les performances de cette technologie, que l'apprentissage vise à optimiser dans une perspective d'amélioration de la performance et de la sécurité du système. Les situations critiques, comme lors d'une défaillance du système, seront particulièrement examinées car elles semblent être les plus dangereuses.

Le parti pris est d'entraîner les automobilistes lors de la première prise en main du véhicule automatisé. Ce genre de situation pourrait correspondre à ce que les concessionnaires proposeraient lors de l'acquisition de cette technologie par un conducteur lorsque les premiers modèles seront commercialisés. Il est également possible d'envisager que, dans l'éventualité de l'instauration d'un permis de conduire spécifique aux véhicules automatisés, des modules de formation soient conçus pour introduire la prise en main de cette nouvelle conduite aux automobilistes ne la connaissant pas. Ainsi, cet entraînement vise à avoir des effets immédiats, c'est-à-dire sur les toutes premières sessions d'utilisation de la conduite complètement automatisée.

L'intérêt d'investiguer les effets à court terme d'un entraînement est de savoir s'il est possible d'observer une amélioration rapide des performances de conduite (par exemple le temps de réponse et la qualité de la reprise de contrôle), et de la sécurité dans un véhicule complètement automatisé. La conduite complètement automatisée implique que le conducteur la délègue à un ordinateur puis reprenne le contrôle manuel du véhicule. Cette reprise de contrôle manuel peut être volontaire ou imposée au conducteur. Les transitions du contrôle de la voiture représentent des enjeux de sécurité. L'automobiliste, ses passagers et les autres usagers de la route, sont directement exposés en cas de problèmes lors de l'utilisation d'un tel système, notamment s'il y a nécessité de reprendre le contrôle de manière inopinée à cause d'un dysfonctionnement, d'une limite ou d'une panne du système. Cette reprise de contrôle manuel peut être influencée par le désengagement du conducteur vis-à-vis de la conduite,

provoquée par l'activation de l'automatisation et renforcée par la réalisation d'une autre tâche que la conduite (par exemple lire des emails, regarder un film, manger, etc.).

Les effets d'un entraînement s'inscrivent dans une logique de répétition de l'action, c'est-à-dire d'un apprentissage qui affecte la mémoire procédurale. La question du transfert d'apprentissage sera également examinée dans la mesure où les utilisateurs d'aides à la conduite (régulateur de vitesse, contrôle de la trajectoire) pourraient avoir des facilités à conduire un véhicule complètement automatisé, même si cette technologie implique des compétences nouvelles (enclencher le système de pilotage automatique, reprendre le contrôle manuel de la conduite). Les compétences sont définies comme *un système de connaissances, conceptuelles et procédurales, organisées en schémas opératoires* (Gillet, 1991). En outre, les connaissances procédurales ne suffisent pas à acquérir une ou des compétences, il est également nécessaire d'avoir des connaissances conceptuelles. En France, la préparation à l'examen du permis de conduire comprend une formation pratique et théorique (Arrêté du 02 juillet 2014 - art. 1). Les questions suivantes se posent concernant la formation à la conduite complètement automatisée. Dans quelles conditions est-il possible d'enclencher le pilotage automatique ? Quel est le potentiel du système ? Quelles sont ses limites ? Quels sont ses principes de base de fonctionnement ? L'apprentissage peut entraîner une amélioration de la performance (le résultat produit par l'action d'un individu) et favoriser l'adoption de comportements plus adaptés à des situations spécifiques. Toutefois, la performance n'est pas nécessairement un indicateur de l'apprentissage. En effet, on peut considérer qu'il y a une amélioration de la performance quand les résultats sont meilleurs, mais également lorsqu'une mauvaise habitude est évitée. Il y a apprentissage lorsque les connaissances sont stockées dans le système nerveux central.

L'entraînement vise à impacter les performances de conduite complètement automatisée, mais la réalisation d'une autre tâche pendant ce mode de pilotage peut également

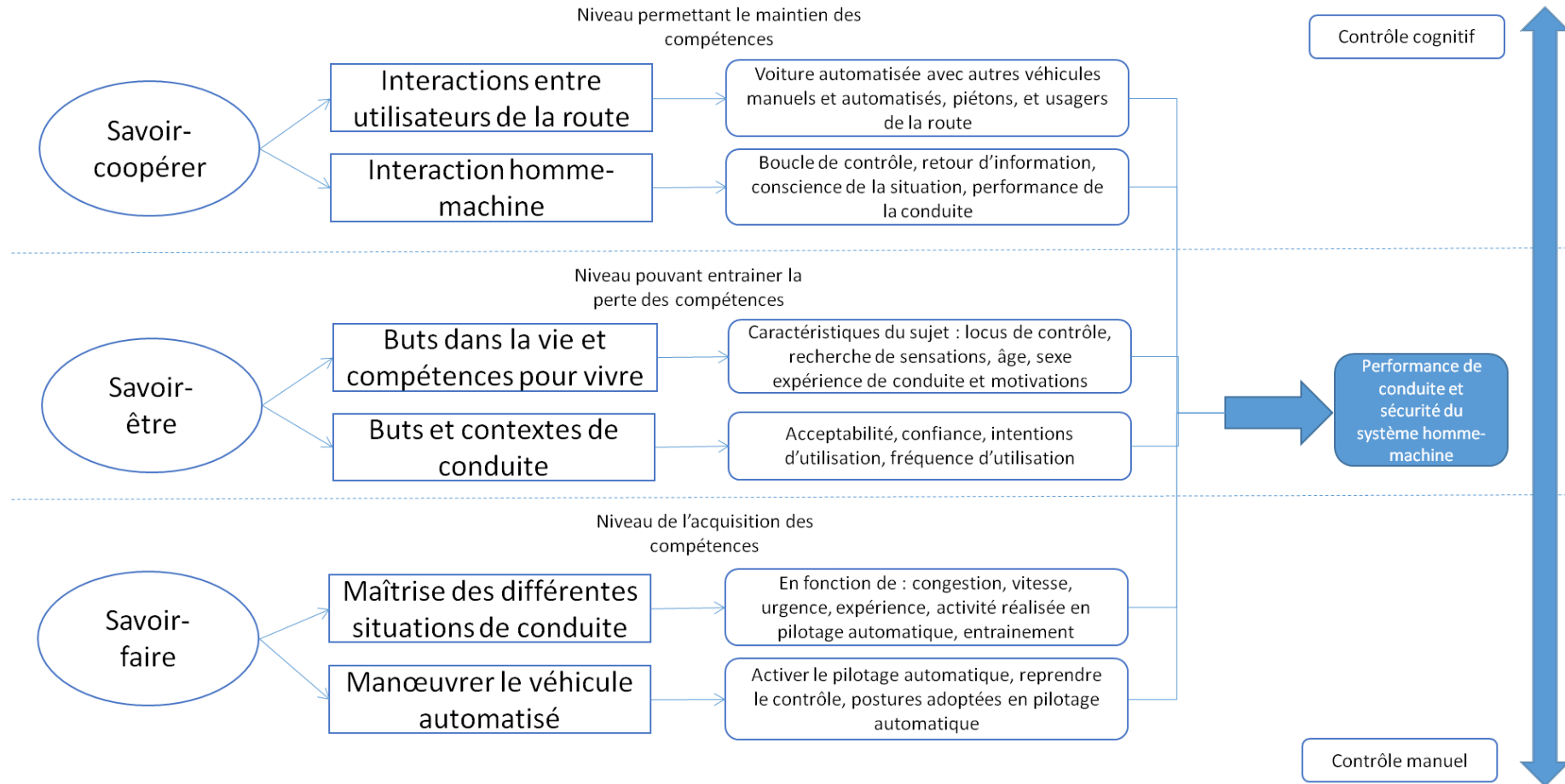
avoir des conséquences. Que se passe-t-il lorsqu'une reprise de contrôle manuel est demandée à l'automobiliste alors que celui est occupé à faire autre chose (par exemple boire un café, lire des emails, regarder un film, etc.) ? La réalisation d'une tâche non reliée à la conduite en mode de pilotage automatique implique une charge de travail physique et/ou mentale. Dans ce cas, l'automobiliste peut être considéré comme plus ou moins désengagé de l'activité de conduite (Kaber *et al.*, 1997). Le contrôle physique et cognitif de la conduite peut être fortement diminué. La conduite devient une tâche secondaire, et reprendre cette activité, notamment en situation d'urgence, peut poser des difficultés qu'il semble crucial de définir.

L'utilisation de cette technologie pose la question de son acceptabilité par ses utilisateurs. L'enjeu de sécurité a été évoqué précédemment, il reste donc à savoir comment et dans quelle mesure les individus utiliseraient cette technologie. L'intention d'utilisation des conducteurs dépend-elle de l'environnement routier (embouteillage, autoroute, centre-ville, campagne) et des conditions d'utilisation (état psychologique et physique de l'automobiliste : consommation de substances psychoactives, fatigue, consommation de médicaments proscrits avant la conduite) ? L'acceptabilité d'une technologie dépend entre autre de son utilité et de son utilisabilité perçue. Elle peut varier selon qu'elle soit mesurée avant ou après interaction avec le système. Par ailleurs, cette notion sera articulée avec la confiance accordée au système. La confiance peut influencer l'utilisation du système, mais également les performances. En effet, des phénomènes de surconfiance et de sous-confiance ont été observés (Lee *et al.*, 2004, p.55) lors de l'utilisation de systèmes automatisés. Ces phénomènes peuvent avoir des conséquences délétères. Différents indicateurs de la confiance peuvent être mesurés lors d'une conduite complètement automatisée. Par exemple, la décision de reprise de contrôle manuel, lors d'un événement potentiellement dangereux mais bien géré par le système (déboitage, proximité avec d'autres véhicules, apparition inopinée d'un objet sur la trajectoire), pourrait indiquer un manque de confiance. Le degré de vérification exercé

(posture du conducteur, regards portés sur la route lors de la réalisation d'une autre activité que la conduite en mode de pilotage automatique), pourrait aussi traduire le niveau de confiance ressenti. Nous cherchons à utiliser l'entraînement pour favoriser une meilleure adaptation du degré de confiance aux capacités du système de conduite complètement automatisée (calibration), afin de prévenir les effets potentiels de surconfiance et de sous-confiance.

Une modélisation des concepts les plus importants de la thèse sont présentés dans la Figure 9. Ils s'articulent entre trois types de savoirs et une adaptation des compétences de conduite manuelle à la conduite complètement automatisée, d'après la matrice GDE.

Figure 9 : Modélisation des interactions entre les compétences et les caractéristiques individuelles des automobilistes dans une voiture automatisée



Trois études sont réalisées dans cette thèse. La première est une enquête adossée à deux études pilotes, les deux suivantes sont réalisées sur simulateur de conduite. Dans la première étude, nous mesurons l'acceptabilité *a priori* de la conduite complètement automatisée en construisant un questionnaire. Les intentions d'utilisation sont également recueillies, afin de savoir dans quels contextes de conduite cette technologie intéresserait les conducteurs. Cette étude a pour objectif de savoir si les automobilistes se déclarent prêts à utiliser cette technologie lorsqu'elle sera commercialisée. Des entretiens avec des automobilistes servent à nourrir cette première recherche. Du fait du confort de conduite apporté par l'automatisation et les nouveaux usages rendus possibles, nous faisons l'hypothèse que la conduite complètement automatisée est *a priori* acceptée par les conducteurs.

Dans une deuxième étude sur simulateur, nous analysons les attitudes et comportements d'automobilistes lors de l'utilisation de la conduite complètement automatisée, sur autoroute, qui est un des cas d'usage préféré par les automobilistes interrogés dans la première étude. Le recours au simulateur nous permettra d'étudier la reprise de contrôle manuel de manière réaliste et sécurisée. Nous cherchons à savoir si un entraînement sous forme de pratique a une influence sur ces attitudes et comportements. L'acceptabilité *a priori* et *a posteriori* sont mesurées. La confiance est mesurée *a posteriori* par un questionnaire. Etant donné que la confiance est un concept dynamique, il semble en effet important de la mesurer après interaction avec le système. Enfin, les temps de réponse pour reprendre le contrôle manuel du véhicule lors d'une panne du système sont mesurés. Le dysfonctionnement ou la panne du système sont des situations dangereuses dans lesquelles la reprise de contrôle manuel peut être plus difficilement réalisée que lors d'une situation anticipée. Le temps de réponse est une variable dépendante qui est considérée comme un indicateur de la performance de la conduite complètement automatisée. Nous avons comparé

deux types de pratique, simple et élaborée, qui correspondent à la première prise en main du véhicule équipé du système de conduite complètement automatisée. La pratique élaborée devrait améliorer davantage la performance mesurée de reprise de contrôle manuel, par rapport à la pratique simple. Un entretien semi-directif à la fin de l'étude sera mené auprès de chaque participant pour recueillir leurs impressions sur l'expérience qu'ils ont vécue.

Dans la troisième étude, nous comparons deux conditions d'entraînement plus développées que dans l'étude précédente. La condition *entraînement simple* ne comprend qu'une pratique sommaire du système. La condition *entraînement élaboré* comprend une pratique avec davantage d'interactions, un texte expliquant les principes de fonctionnement de cette technologie, et enfin une vidéo d'illustration de l'utilisation de la conduite complètement automatisée. Une deuxième variable indépendante est introduite, à savoir la réalisation ou non d'une tâche non reliée à la conduite lorsque le véhicule est en mode de pilotage automatique. La conduite complètement automatisée va permettre aux conducteurs de s'engager dans d'autres tâches, et nous cherchons à évaluer l'impact de la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite sur la reprise de contrôle manuel, notamment en cas d'urgence. Deux indicateurs de la performance de la conduite complètement automatisée sont recueillis : le temps de réponse et la précision de l'utilisation des pédales lors de la reprise de contrôle en cas de panne du système. Deux pannes ont lieu de manière inattendue : l'une à haute vitesse sur une voie dégagée de toute circulation, l'autre à basse vitesse avec la présence de véhicules proches de celui du participant. Qui plus est, trois indicateurs comportementaux de la confiance sont recueillis. Le premier est le nombre de regards portés sur la route lors de la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite. Le deuxième concerne la reprise de contrôle possible de la conduite lorsque le système signale au conducteur une baisse de fiabilité. Le troisième est la confiance déclarée des participants, recueillie à l'aide d'un questionnaire post expérimental. L'acceptabilité *a priori a posteriori* sont également mesurées pour savoir s'il y a des

différences avec la deuxième étude. Une tâche de listage d'idées (Greenwald, 1968 ; Rothman, Salovey, Antone, Keough, & Martin, 1993) est proposée à la fin de l'étude à chaque participant pour recueillir leurs impressions lorsqu'ils/elles étaient en mode de pilotage automatique.

Chapitre V :

Etudes empiriques

Chapitre V : Etudes empiriques

1. Etude 1 : Intention d'utiliser une voiture complètement automatisée : attitudes et acceptabilité *a priori*

Afin de comprendre et d'estimer dans quelle mesure les conducteurs souhaiteraient utiliser une voiture complètement automatisée, un questionnaire basé sur des entretiens, a été élaboré (Payre, Cestac, & Delhomme, 2014).

1.1. Introduction

La terminologie utilisée pour qualifier les voitures automatisées est variée : conduite automatisée, conduite partiellement automatisée et conduite hautement automatisée (par exemple, Jamson *et al.*, 2013). Etant donné que les voitures complètement automatisées ne sont pas encore commercialisées, il est important de déterminer l'acceptabilité, les attitudes et les intentions d'utilisation des conducteurs à l'égard de la CCA. Ces thématiques, appliquées à des niveaux d'automatisation plus élevés, n'ont pas encore été totalement traitées.

Cette première étude porte sur les attitudes envers la conduite complètement automatisée. L'objectif était de construire un outil permettant d'évaluer les attitudes à l'égard de cette technologie et son acceptabilité par des usagers potentiels. Une échelle d'acceptabilité *a priori* en français a été construite. Cet outil rend compte du degré d'acceptabilité de cette nouvelle technologie de conduite par des automobilistes non-professionnels. Sont-ils prêts à utiliser la CCA ? Dans quels contextes ?

1.2. Objectifs

Etudier spécifiquement la CCA est nouveau car la recherche sur les attitudes et les comportements vis-à-vis de la conduite automatisée porte essentiellement sur l'automatisation partielle (Özkan, *et al.*, 2005 ; voir Saad *et al.*, 2004 ; Stanton *et al.*, 1998, 2005), particulièrement sur les régulateurs de vitesse adaptatifs et plus généralement sur les dispositifs classés aux niveaux 1 et 2 par la NHTSA. Les objectifs de cette première étude sont d'évaluer si les conducteurs ont l'intention d'utiliser la CCA, et si cette intention d'utiliser cette nouvelle technologie peut être prédite par l'acceptabilité *a priori*, les attitudes, les traits de personnalité et l'adaptation comportementale à la conduite automatisée. Comme les outils spécifiques pour évaluer les attitudes des automobilistes à l'égard de cette technologie n'existent pas encore, deux études pilotes ont été réalisées pour explorer les motivations, les attitudes, et les intentions d'utiliser la CCA. Le recours à des études pilotes permet généralement d'augmenter la validité de l'outil (Delhomme & Meyer, 2002 ; Robson, 1993).

1.3. Etudes pilotes

L'objectif est de poser des questions aux conducteurs sur la CCA, en fonction de leur expérience de conduite, avec ou sans aides à la conduite, et des connaissances que nous avons acquises grâce à une revue de la littérature.

1.3.1. Première étude pilote

1.3.1.1. Participants

Pour commencer, cinq entretiens semi-directifs ont été menés pour recueillir des informations à propos de l'acceptabilité et de l'intention d'utiliser la CCA (voir Annexe 1.1). Les participants, tous des hommes, sont aussi bien des novices que des initiés en termes de connaissance de la conduite automatisée.

1.3.1.2. Procédure

Le guide d'entretien semi-directif est basé sur l'état de l'art de la conduite automatisée, l'automatisation et les habitudes de conduite. Des informations basées sur des comptes rendus de constructeurs et de colloques ont aussi été utilisées pour définir quel type de CCA sera présentée. Les participants de cette étude pilote ont été interrogés en face-à-face. Les entretiens ont duré entre 30 et 60 min. Une courte description de la voiture complètement automatisée a été donnée aux participants accompagnée de cas d'usage et d'exemple : *Une voiture automatisée est un véhicule dont les fonctions de conduite sont assurées par un ordinateur intégré au véhicule. Il est capable de prendre en charge la vitesse, les distances inter-véhicules, le freinage et les manœuvres du véhicule. Cette voiture automatisée a été conçue de telle sorte que n'importe quel conducteur puisse l'utiliser.* Il leur a été dit par ailleurs que dans une telle voiture, ils restent responsables de la conduite et du véhicule.

1.3.1.3. Mesures

Dix questions ont été formulées aux participants. Tout d'abord, les premières portaient sur leur intérêt pour une voiture complètement automatisée. Ensuite, les suivantes portaient sur le contexte dans lequel ils l'utiliseraient, ce qu'ils attendraient de ce type de technologie et s'ils se sentiraient responsables de la conduite et du véhicule lorsque le pilotage automatique serait activé. Pour finir, des questions ont été posées sur l'intention d'utiliser la CCA en état physique dégradé.

1.3.1.4. Résultats

Les entretiens ont donné des indications sur les conditions favorisant l'acceptabilité de la CCA par les conducteurs. Par exemple, l'environnement de conduite est un élément récurrent apparu dans les verbatim, par exemple *Je n'utiliserai pas un tel dispositif dans une ville (en centre-ville) car c'est trop risqué, surtout lorsque des enfants traversent la rue* (mentionné par les cinq participants) ; *Je pourrais utiliser la conduite automatisée pour un*

long voyage, quand la conduite n'est pas stressante (mentionné par quatre participants). Des questions sur l'utilisation de la CCA en état physique dégradé ont aussi été posées. La conduite en état d'ébriété, sous l'influence de médicaments proscrits avant la conduite, et en état de fatigue ont été évoqués. Deux participants sur cinq ont déclaré être potentiellement tentés d'utiliser la CCA en ayant dépassé la limite légale de consommation d'alcool, deux autres participants ont déclaré qu'ils pourraient l'utiliser après avoir consommé des médicaments ayant des effets secondaires, par exemple, Christophe (38 ans, initié) : *Prendre des médicaments et utiliser la conduite automatisée me tenterait. J'ai déjà eu des problèmes de santé qui m'ont contraint à prendre les transports en commun. Le désavantage c'est qu'on est toujours responsable de la conduite.*

1.3.2. Deuxième étude pilote

Basées sur l'analyse des entretiens de la première étude pilote, des questions fermées ont été formulées sur l'acceptabilité *a priori* et l'intention d'utiliser la CCA, menant à la construction d'un questionnaire comportant 39 items. L'objectif était de créer un premier outil permettant d'évaluer l'acceptabilité *a priori* et les intentions.

1.3.2.1 Participants

Dans cette seconde étude pilote, 45 participants ont répondu à un questionnaire, 52.2% d'entre eux étaient des femmes. L'âge moyen de l'échantillon était de 33.6 ans, Min = 19, Max = 68. En moyenne, les participants avaient un permis de conduire valide depuis 15.4 années, et avaient parcouru 194 km la semaine précédant leurs réponses au questionnaire pilote.

1.3.2.2 Procédure

Les réponses ont été collectées avec une version papier du questionnaire. Les participants, recrutés par annonce, n'ont pas été observés pendant qu'ils y répondaient. Une

courte description de la voiture complètement automatisée leur a été fournie, la même que lors de la première étude pilote. De même, il leur a été indiqué qu'ils étaient responsables de la conduite et du véhicule. Le temps de réponse moyen était de 15 min.

1.3.2.3 Mesures

Une échelle de Likert en 7 points a été utilisée, allant de 1 : Je ne suis pas du tout d'accord à 7 : Je suis tout à fait d'accord. Le questionnaire était divisé en sept thèmes:

- 1: Le niveau d'automatisation qu'ils veulent utiliser, par exemple *Je voudrais choisir quelle fonction de la conduite est automatisée*, $M = 6.45$ ($SD = .59$, Min = 5, Max = 7) ;
- 2 : L'intention d'utiliser la CCA en fonction de l'environnement routier (10 items), par exemple *Si la conduite était ennuyante, je la délèguerais au système de conduite automatisée plutôt que de conduire moi-même*, $M = 5.02$ ($SD = 1.88$, Min = 1, Max = 7) ; *Je préférerais utiliser le système de conduite automatisée sur l'autoroute plutôt que de conduire moi-même*, $M = 5.31$ ($SD = 1.95$, Min = 1, Max = 7) ;
- 3 : Les situations dans lesquelles ils préféreraient reprendre le contrôle au pilotage automatique, par exemple *J'aimerais reprendre le contrôle du véhicule au pilotage automatique si je n'aimais pas la manière dont il conduit*, $M = 6.38$ ($SD = 1.07$, Min = 1, Max = 7) ;
- 4 : L'intérêt à utiliser la conduite automatisée en état physique dégradé, par exemple (3 items) *Je délèguerais la conduite au système de conduite automatisée si : j'étais au-dessus de la limite légale* $M = 6.11$ ($SD = 1.67$, Min = 1, Max = 7) ; *si j'étais fatigué*, $M = 5.38$ ($SD = 1.87$, Min = 1, Max = 7) ; *si j'avais pris des médicaments proscrits avant de conduire ayant des effets secondaires*, $M = 5.42$ ($SD = 1.97$, Min = 1, Max = 7) ;

- 5 : L'intention d'utiliser une voiture automatisée avec d'autres passagers à bord, par exemple, *Si j'avais des passagers dans ma voiture automatisée, je préférerais conduire moi-même plutôt que de déléguer au système de conduite automatisée*, $M = 4.37$ ($SD = 1.65$, $Min = 1$, $Max = 7$) ;
- 6 : Leur estimation en heures du temps supplémentaire nécessaire pour apprendre à conduire une voiture automatisée, par exemple *Selon moi, de combien de temps aurais-je besoin pour apprendre à conduire une voiture automatisée ?* $M = 9.2$ ($SD = 9.5$, $min = 1$, $max = 50$) ;
- 7 : Les variables sociodémographiques suivantes ont été recueillies : âge, genre, niveau académique, profession, année d'obtention du permis de conduire et combien de kilomètres ils ont conduit la semaine précédant les réponses au questionnaire.

1.3.2.4 Résultats

Une analyse factorielle exploratoire a été réalisée. Une rotation oblimin a été appliquée, la méthode d'extraction choisie était celle en composante principale. Onze facteurs ont été identifiés car leurs valeurs propres étaient supérieures à un. Les deux premiers facteurs ont été sélectionnés parce qu'ils expliquent respectivement 25% et 12% de la variance. Ces deux groupes d'items ont du sens et sont cohérents pour chaque facteur. Les items redondants et ayant un poids factoriel faible ont été exclus. Enfin, sept items au total ont été conservés en raison de leur poids factoriel élevé ($>.65$) dans leur dimension respective. Une deuxième analyse factorielle, avec à nouveau une extraction en composante principale et une rotation oblimin, a été réalisée sur ces sept items. Nous avons bien retrouvé les deux dimensions dont les valeurs propres sont supérieures à un. La première dimension (42% de la variance) correspond à l'acceptabilité contextuelle d'un système de conduite automatisée ($\alpha = .83$), (quatre items) :

1. *Je préférerais garder le contrôle manuel du véhicule plutôt que de le déléguer au système de conduite automatisée, en toute occasion, $M = 3.8$ ($SD = 2.04$, $\text{Min} = 1$, $\text{Max} = 7$) ;*
2. *Le système de conduite automatisée me procurerait de la sécurité comparé à la conduite manuelle; $M = 3.67$ ($SD = 1.7$, $\text{Min} = 1$, $\text{Max} = 7$) ;*
3. *Si la conduite était ennuyante, je la délèguerais au système de conduite automatisée plutôt que de conduire moi-même, $M = 5.02$ ($SD = 1.88$, $\text{Min} = 1$, $\text{Max} = 7$) ;*
4. *Si j'avais des passagers dans ma voiture automatisée, je préférerais conduire moi-même plutôt que déléguer au système de conduite automatisé, $M = 4.37$ ($SD = 1.65$, $\text{Min} = 1$, $\text{Max} = 7$).*

La deuxième dimension (25% de la variance) fait référence à l'intérêt d'utiliser la conduite automatisée en condition physique dégradée ($\alpha = .72$), (trois items) :

1. *Je délèguerais la conduite au système de conduite automatisée si je dépassais le taux légal d'alcoolémie, $M = 6.11$ ($SD = 1.67$, $\text{Min} = 1$, $\text{Max} = 7$) ;*
2. *Je délèguerais la conduite au système de conduite automatisée si j'étais fatigué(e), $M = 5.38$ ($SD = 1.87$, $\text{Min} = 1$, $\text{Max} = 7$) ;*
3. *Je délèguerais la conduite au système de conduite automatisée si j'avais pris des médicaments proscrits avant de conduire, $M = 5.42$ ($SD = 1.97$, $\text{Min} = 1$, $\text{Max} = 7$) ;*

Cette seconde étude pilote a permis de créer une échelle d'acceptabilité qui sera utilisée par la suite.

1.4. Etude principale

1.4.1. Hypothèses

Les résultats des deux études pilotes et la revue de littérature présentée précédemment ont abouti à la construction d'un questionnaire et à la formulation des hypothèses qui en découlent. Cette première étude visait à explorer deux questions à propos de la CCA. La première est : dans quelle mesure les conducteurs accepteraient *a priori* la CCA ? S'ils l'acceptent, dans quelle mesure l'utiliseraient-ils ? La première hypothèse est que les conducteurs accepteraient *a priori* la CCA à cause de ses caractéristiques (par exemple le contrôle longitudinal et latéral) ; il est attendu que la CCA serait considérée comme plus utile que la conduite manuelle (H1), comme cela a été observé par Hoedemaeker *et al.* (1998) et Hoedemaeker *et al.* (2001), bien que les auteurs aient utilisé l'automatisation partielle. Il est également attendu que les attitudes prédisent l'intention d'utiliser une voiture complètement automatisée (H2). De plus, nous faisons l'hypothèse que les traits de personnalité comme la recherche de sensations et le locus de contrôle sont liés à l'intention d'utilisation d'un tel système. Ainsi, il est supposé que les chercheurs de sensations au volant auront plus l'intention d'utiliser cette technologie que les individus qui ne cherchent pas de sensations au volant (H3a) (Rudin-Brown *et al.*, 2004), et que les conducteurs ayant un locus de contrôle externe auront davantage l'intention de l'utiliser que les individus ayant un locus de contrôle interne (H3b) (Rudin-Brown *et al.*, 2002 ; Rudin-Brown *et al.*, 2004). La quatrième hypothèse est que la volonté d'utiliser une voiture complètement automatisée dépend de l'environnement de conduite, sur la base de la première étude pilote, les conducteurs étaient plus intéressés par l'utilisation de la CCA sur autoroute, dans les embouteillages et lors de conduite monotone en centre-ville (H4). De plus, les conducteurs seront plus intéressés pour utiliser une voiture complètement automatisée lorsqu'ils sont dans un état physique dégradé, à nouveau sur la base de la première étude mais aussi de la théorie de l'homéostasie du risque (H5). Enfin,

nous faisons l'hypothèse que comparées à celle des femmes aux femmes, les attitudes des hommes envers la CCA seront plus positives, et aussi qu'ils auront davantage l'intention de l'utiliser que les femmes (Venkatesh *et al.*, 2000) (H6). Ces hypothèses seront testées en utilisant un questionnaire en ligne.

1.4.2. Méthode

1.4.2.1 Participants

Un échantillon de 421 conducteurs (153 hommes) a participé à l'étude. Parmi eux, 62 participants n'ont pas répondu entièrement au questionnaire, ils ont été toutefois inclus. L'âge moyen de l'échantillon est 40.2 ($SD = 15.9$, Min = 19, Max = 82). Les participants ont déclaré avoir leur permis de conduire B depuis 20.8 ans en moyenne ($SD = 14.15.8$, Min = 0, Max = 63), et avoir conduit en moyenne 250km la semaine précédant l'enquête ($SD = 305.6$, Min = 0, Max = 2000).

1.4.2.2 Procédure

Le questionnaire a été diffusé, entre autres, à des listes de diffusion en ergonomie, psychologie et ingénierie. Seuls les participants ayant le permis de conduire ont été autorisés à participer à l'étude.

1.4.2.3 Mesures

Le questionnaire était présenté comme une enquête visant à évaluer les comportements à l'égard de la CCA. Le questionnaire comprenait six sections. Dans la première, une description courte et simple de la voiture complètement automatisée a été présentée (la même que dans les études pilotes), accompagnée d'exemples et de cas d'usage. Il a été demandé aux conducteurs de s'imaginer en train de conduire une telle voiture en mode de pilotage automatique : *Imaginez-vous en train de faire un voyage. Vous êtes conducteur dans votre propre véhicule qui est équipé avec un système de conduite automatisée.* Il leur a également

été stipulé qu'ils étaient responsables de la voiture et de la conduite. Les participants ont commencé le questionnaire après avoir confirmé avoir compris ce qu'est la CCA. Une échelle en 7 points de Likert (1 : *je ne suis pas du tout d'accord*, 7 : *je suis tout à fait d'accord*) a été utilisée pour mesurer les réponses aux questions posées.

La deuxième section du questionnaire était constituée des deux dimensions d'acceptabilité *a priori* de la CCA extraites de la deuxième étude pilote.

Dans la troisième section, 7 items questions sont présentées dans un ordre aléatoire pour mesurer l'acceptabilité *a priori*. Comme dans l'étude pilote, l'analyse factorielle a permis de confirmer les deux dimensions de cet ensemble d'items qui composent l'échelle d'acceptabilité *a priori* de la CCA : acceptabilité contextuelle de la CCA, $\alpha = .72$, et intérêt à utiliser la CCA en condition physique dégradée, $\alpha = .89$. La consistance interne de l'échelle d'acceptabilité *a priori* de la CCA est bonne, $\alpha = .77$. L'analyse factorielle confirmatoire est présentée plus bas.

La quatrième section est composée de l'échelle d'internalité $\alpha = .87$, $M = 6.4$, $SD = 3.7$, et d'externalité de la conduite, $\alpha = .75$, $M = 5.8$, $SD = 0.74$, selon notre adaptation en français de l'échelle de locus de contrôle de Montag *et al.* (1987). Chaque échelle comprend 15 items.

Dans la cinquième section, les questions sur les intentions d'utilisation de la CCA automatisée, l'intention d'achat, la propension à payer (question ouverte), sur quel genre de route ou dans quelle condition de trafic ils préféreraient utiliser le système, et enfin les attitudes à l'égard de la conduite automatisée (*Je considère la conduite complètement automatisée comme plaisante vs. déplaisante, inutile vs. utile, dangereuse vs. sûre*). Ces trois items ont été rassemblés en une dimension, $\alpha = .88$, $M = 4.56$, $SD = 1.49$.

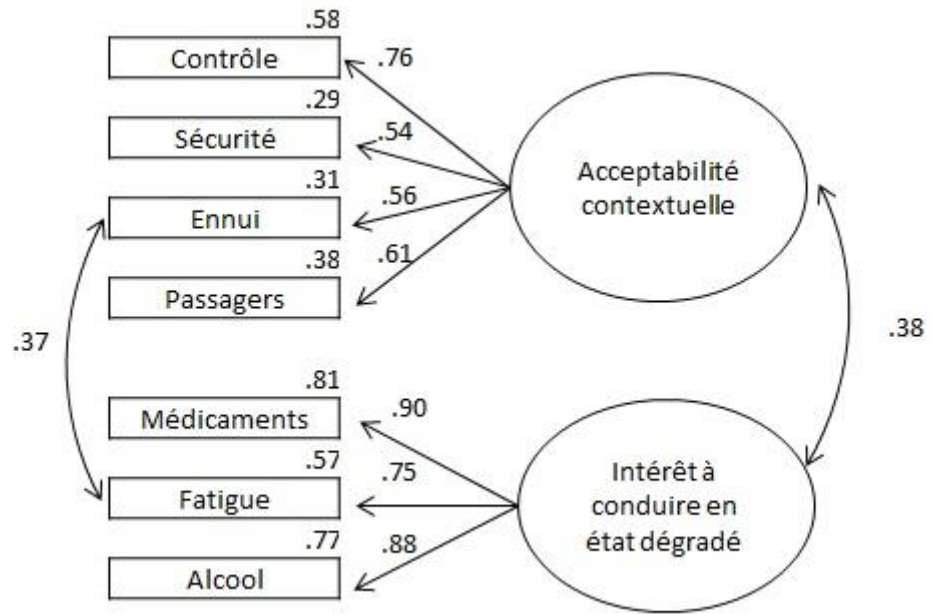
Dans la sixième section, les participants ont répondu à l'échelle de recherche de sensations au volant en 7 items (Taubman *et al.*, 1996), $\alpha = .75$. Les analyses factorielles confirmatoires ont validé l'unidimensionnalité de cette échelle, avec 42.5% de variance expliquée.

Dans la dernière section, ils ont répondu à des questions sociodémographiques : genre, âge, année d'obtention du permis de conduire, kilomètres parcourus en tant que conducteur la semaine précédant le questionnaire et les heures supplémentaires estimées pour apprendre la CCA.

1.4.3. Résultats

Une analyse factorielle confirmatoire a été réalisée sur l'échelle d'acceptabilité de la CCA, afin de tester la structure en deux facteurs trouvée dans l'étude pilote : intention d'utiliser la CCA en état physique dégradé et l'acceptabilité contextuelle (Figure 10). Cette structure a été confirmée, et le modèle a des indicateurs d'ajustement acceptables (NFI = 0.96, RSMEA = 0.07, CFI = 0.97). En effet, l'indicateur NFI indique une bonne valeur d'ajustement quand celle-ci est supérieure à 0.95 (Jöreskog & Sörbom, 1989), la valeur RMSEA est acceptable quand elle est inférieure à 0.08 (Browne & Cudeck, 1989), et une valeur de CFI supérieure ou égale à 0.95 est considérée comme un bon indicateur d'ajustement (Hu & Bentler, 1999). Les deux dimensions sont corrélées positivement, $r = .38$. De plus, l'item *Ennui* du premier facteur est corrélé avec l'item *Fatigue* du second facteur

Figure 10 : Echelle d'acceptabilité *a priori* de la conduite complètement automatisée



Note: tous les paramètres sont significatifs, $p < .001$

L'analyse descriptive des résultats de l'étude est présentée dans la prochaine section, suivie de l'analyse de régression linéaire visant à expliquer l'intention d'utiliser la CCA.

1.4.4. Analyse descriptive

Dans notre échantillon, 68.1% des participants ont eu un score supérieur à 4 (la valeur centrale théorique de l'échelle de Likert en 7 points) à l'échelle d'acceptabilité *a priori* de la CCA. Concernant les deux dimensions de cette échelle, 70.6% des participants ont eu un score supérieur à 4 à la dimension évaluant l'intérêt à utiliser la CCA en état dégradé, et 52% d'entre eux ont également eu un score supérieur à la médiane de la dimension acceptabilité contextuelle de la CCA. La plupart d'entre eux sont intéressés par l'utilisation d'une voiture complètement automatisée, 52.2% ayant un score supérieur au point central de cette échelle, $M = 4.46$ ($SD = 1.84$, Min = 1, Max = 7) toutefois, l'intention d'achat est plus faible, $M = 3.54$ ($SD = 1.98$, Min = 1, Max = 7), cf. Tableau 12.

Lorsque les participants ont envisagé d'acheter un tel véhicule (78% de l'échantillon ayant un score supérieur à 1), ils ont déclaré être prêts à dépenser en moyenne 1624€ ($SD =$

2112, Min = 01, Max = 10000). Les attitudes envers la CCA sont plutôt positives, $M = 4.56$ ($SD = 1.49$, Min = 1, Max = 7). Le temps moyen estimé par les répondants est d'environ 7h, $M = 6.92$ ($SD = 7.6$, Min = 0, Max = 72). C'est deux heures de moins que dans l'étude pilote.

Conformément aux hypothèses, il y a une corrélation positive significative entre l'acceptabilité contextuelle et les attitudes, ce qui confirme les résultats de recherches précédentes (Parasuraman *et al.*, 1992). Hormis pour le genre, de faibles corrélations ont été observées avec l'adaptation de l'échelle de Montag et Comrey. De faibles corrélations ont aussi été observées entre l'internalité de la conduite et l'acceptabilité d'une part, mais également les attitudes d'autre part (Tableau 11), $r = .12$. L'externalité de la conduite est très légèrement corrélée avec l'échelle de recherche de sensations au volant, $r = .13$. Une corrélation élevée entre les attitudes envers la CCA et l'intention d'utiliser mais aussi l'intention d'acheter une voiture complètement automatisée a été trouvée (Tableau 11). Enfin, une corrélation significative a été observée entre l'échelle de recherche de sensations au volant et l'intérêt d'utiliser la CCA en état physique dégradé, $r = .1$, $p < .05$

Tableau 11 : Moyennes, dispersion et corrélations entre les variables du questionnaire ($N = 421$)

	<i>M</i>	<i>SD</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Intention d'utiliser	4.46	1.84										
2. Intention d'acheter	3.54	1.98	.79**									
3. Propension à payer	1624	2124	.32**	.39**								
4. Genre	-	-	-.22**	-.18**	-.09							
5. Age	40.23	15.86	.08	.09	-.19**	-.18**						
6. Intérêt pour la conduite dégradée	5.03	2.00	.37**	.27**	.15**	-.10	.09					
7. Acceptabilité	4.16	1.39	.69**	.63**	.26**	-.23**	.17**	.36**				
8. Recherche de sensations	2.84	1.13	.15**	.12*	.10*	-.24**	-.23**	.10*	.06			
9. Attitudes	4.56	1.49	.80**	.76**	.34**	-.24**	.07	.38**	.71**	.12*		
10. Externalité de la conduite	5.80	0.74	-.05	-.01	.01	.06	.13**	.05	-.02	.13**	.02	
11. Internalité de la conduite	6.40	3.70	.08	.15**	.05	-.05	.23**	.06	.12*	-.04	.12*	.01

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

Concernant les cas d'usage de la CCA, les participants ont déclaré qu'ils l'utiliseraient en moyenne 67.2% du temps pour se garer ($SD = 36.6$) 62.3% du temps sur l'autoroute, $SD = 34.4$, et 60% du temps dans les embouteillages ($SD = 38.9$). Utiliser la CCA en centre-ville ne serait choisi que dans 29% du temps ($SD = 32.5$).

Tableau 12 : Moyennes et effets du genre

	$M_{\text{♂}}$	$M_{\text{♀}}$	F (ddl=1)	η^2
Intention d'utiliser	5.01	4.18	20.6*	.05
Intention d'achat	4.03	3.27	14.2*	.03
Propension à payer	1877	1468	n.s.	-
Age	43.75	38.05	12.8*	.03
Intérêt pour la conduite dégradée	5.31	4.92	n.s.	-
Acceptabilité contextuelle	4.62	3.97	22.3*	.05
Recherche de sensations	3.19	2.63	24.7*	.06
Attitudes	5.04	4.31	24.5*	.06

Note: * $p < .001$.

Un effet du genre sur l'intention d'utiliser et d'acheter une voiture automatisée a également été observé (Tableau 11). Les hommes veulent davantage l'utiliser et l'acheter que les femmes. Ils déclarent également être plus intéressés pour l'utiliser en état physique dégradé. Ils acceptent plus la CCA et manifestent davantage d'attitudes positives vis-à-vis d'elle que les femmes.

1.4.5. Analyse de régression

Une régression linéaire hiérarchique a été réalisée pour tester quels étaient les prédicteurs de l'intention d'utiliser une voiture complètement automatisée. La variable dépendante est l'item : *Je serais prêt(e) à utiliser une voiture automatisée à la place d'une voiture normale*. L'introduction des 6 variables indépendantes dans l'analyse a été réalisée en trois étapes (Tableau 13). Les analyses ont montré que l'intention d'utiliser une voiture automatisée est affectée par les attitudes à l'égard de la conduite automatisée, $\beta = 0.616$, $p <$

.001, l'acceptabilité contextuelle, $\beta = 0.238$, $p < .001$, et la recherche de sensations au volant, $\beta = 0.067$, $p < .05$. Un effet du genre a été observé dans la première étape uniquement, $\beta = -0.161$, $p < .05$, ce qui signifie que les hommes étaient légèrement plus intéressés que les femmes à utiliser un tel véhicule. Cependant, lorsque l'acceptabilité contextuelle a été incluse dans la régression, le genre a perdu sa part de variance expliquée. Il n'y a pas eu d'effet significatif de l'âge. En outre, l'intérêt d'utiliser la conduite automatisée en état physiologique dégradé a expliqué une part de l'intention d'utiliser la CCA quand cette variable a été incluse dans la deuxième étape de la régression, $\beta = 0.11$, $p < .05$. Toutefois, cet effet n'est plus significatif dès que les attitudes envers la conduite automatisée ont été introduites dans la troisième et dernière étape. La recherche de sensations au volant a expliqué une partie de la variance dans chacune des étapes de l'analyse. Toutefois, cette part diminue entre la première étape, $\beta = 0.136$, $p < .05$ et la dernière étape, $\beta = 0.067$, $p < .05$.

Tableau 13 : Régression linéaire hiérarchique de l'intention d'utiliser une voiture complètement automatisée

	ΔR^2	Etape 1	Etape 2	Etape 3
<i>Etape 1</i>	.05			
Genre		-.16**	-.04	.02
Age		.09	-.02	.02
Recherche de sensations		.14*	.09*	.07*
<i>Etape 2</i>	.43			
Intention conduite dégradée			.11**	.04
Acceptabilité contextuelle			.63***	.24***
<i>Etape 3</i>	.19			
Attitudes				.62***

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$, le genre est une variable nominale, codée Homme = 1 et Femme = 2.

1.5. Résumé des principaux résultats de l'étude 1

Résumé des principaux résultats de l'étude 1 : 421 conducteurs français (153 hommes, $M = 40.2$ ans, amplitude 19-73 ans) ont répondu à un questionnaire en ligne. 68.1% de l'échantillon a accepté *a priori* la conduite complètement automatisée (CCA). Les prédictors de l'intention d'utiliser une voiture complètement automatisée ($R^2 = .671$) sont les attitudes, l'acceptabilité contextuelle et l'intérêt déclaré à conduire en état dégradé (deux composants de l'acceptabilité de la CCA), suivis par la recherche de sensations au volant et enfin par le genre. Les cas d'usage de la CCA les plus sollicités sont l'autoroute, les situations d'embouteillages et pour se garer. Qui plus est, 70.6% des personnes interrogées ont déclaré avoir un intérêt pour utiliser ce type de conduite en état physique dégradé, alors même qu'on leur ait rappelé qu'ils sont responsables tant du véhicule que de la conduite.

1.6. Discussion

La conduite complètement automatisée (CCA) est nouvelle notamment en France, et peu de gens ont pu avoir des interactions avec cette technologie. Pour cette raison, cette étude avait pour objectif de prédire les intentions d'usage d'un tel véhicule, et d'évaluer l'acceptabilité *a priori* et des attitudes. Un peu plus de deux tiers des conducteurs de notre échantillon seraient *a priori* favorables à l'utilisation de la CCA (ils ont un score moyen supérieur à la valeur centrale de l'échelle de Likert) (H1). Ce résultat est en accord avec ceux des recherches sur l'automatisation partielle et les aides avancées à la conduite (Nilsson, 1995 ; Saad *et al.*, 1996 ; Stanton *et al.*, 1997 ; de Waard *et al.*, 1999), à la différence qu'il était demandé aux conducteurs de la première étude de répondre au questionnaire en fonction d'une description de la CCA et non en fonction d'un usage réel. Enfin, il est possible que les

conducteurs aient un jugement négatif vis-à-vis des personnes utilisant la CCA (Lefevre *et al.*, 2008), ce qui devrait être pris en considération dans de prochaines études.

Les usages et les attitudes envers cette nouvelle technologie automobile ont été mis en lumière. Une forte corrélation positive entre les attitudes et les intentions d'utiliser la CCA a été observée, ce qui est commun dans le domaine des comportements routiers (H2). L'intention d'utiliser la CCA ($R^2 = 0.67$) est partiellement expliquée par les attitudes ($\beta = 0.62$), l'acceptabilité contextuelle ($\beta = 0.24$) et l'échelle de recherche de sensations au volant ($\beta = 0.067$). L'intérêt d'utiliser la CCA en état physiologique dégradé, le genre et l'âge ne sont pas des prédictors dans la dernière étape de la régression linéaire.

Conformément à nos attentes, plus la recherche de sensations au volant est élevée, plus les conducteurs ont l'intention d'utiliser la CCA (H3a). Toutefois, l'échelle de recherche de sensations au volant (7 items), ne nous permet donc pas de dire si ce résultat est lié à la recherche d'aventure ou de nouveauté, la désinhibition ou l'ennui si l'on se réfère à l'échelle de recherche de sensations de Zuckerman (1994). Par exemple, la recherche de nouveautés pourrait augmenter l'intention d'utiliser la CCA de prime abord, mais une fois habitués à la CCA, les conducteurs pourraient ne plus ressentir la nouveauté de cette technologie. Les relations entre les différentes dimensions de la recherche de sensations et les intentions d'utiliser la CCA restent encore à instruire.

De manière inattendue, aucune corrélation significative n'a été trouvée entre le locus de contrôle de conduite externe et l'acceptabilité *a priori* d'une part, et les attitudes envers la CCA d'autre part (H3b). Cela pourrait être expliqué par l'absence de corrélation significative entre les deux échelles d'internalité et externalité, alors que Montag et Comrey en avaient observé une négative dans leur recherche initiale, $r = -.18$. Il est aussi possible que cette absence de corrélation provienne de notre adaptation de l'échelle en français. En outre, les individus ayant un locus de contrôle externe pourraient avoir besoin d'utiliser cette

technologie pour comparer et évaluer les capacités du système par rapport aux leurs. Cette question devrait être traitée dans les futures recherches sur la CCA.

L'intention d'utiliser la CCA a varié en fonction des cas d'usage (H4). En effet, les situations les plus intéressantes pour les participants sont celles liées à la monotonie (autoroute) ou anxiogènes (embouteillages). La CCA est perçue positivement quand elle est associée à ces cas d'usage. Ce résultat est similaire à ceux trouvés dans des études portant sur l'utilisation d'un régulateur de vitesse dans des situations de conduite monotone (Fancher *et al.*, 1998 ; Saad *et al.*, 1996) : la CCA, en assurant le contrôle longitudinal et latéral du véhicule ainsi que les manœuvres, rend la conduite monotone ou anxiogène moins déplaisante. Toutefois, dans la présente étude, la CCA est considérée comme moins intéressante pour un usage en centre-ville – qui pourrait être considéré comme une situation anxiogène – peut-être parce que les conducteurs se sentent plus confiants vis-à-vis de leurs compétences quand les dangers de la route sont considérés comme plus fréquents. Les niveaux d'anxiété et la difficulté de la conduite peuvent être plus importants en centre-ville que dans les autres cas d'usage. Ce résultat est cohérent avec les entretiens de la première étude pilote. Les constructeurs devraient être intéressés par de tels résultats car l'automatisation à basse vitesse existe sur certains véhicules haut de gamme de nos jours et est conçue pour être utilisée en ville ou dans les embouteillages. Comme il l'a été dit à propos de l'acceptabilité *a priori* et l'intention d'utiliser une voiture complètement automatisée, les intentions des conducteurs d'utiliser un tel système pourraient changer après un temps d'utilisation.

Près de 71% des participants ont déclaré avoir l'intention d'utiliser la CCA en condition physique dégradée (H5) Ce résultat pourrait paraître surprenant comparé à la conduite manuelle. En effet, 45% des conducteurs français ont déclaré avoir conduit après avoir bu de l'alcool, même en petite quantité, dans le mois précédant l'étude ; en Europe, en

moyenne 31% des conducteurs de voiture ont déclaré avoir bu une petite quantité d'alcool avant de conduire au moins une fois dans le mois précédent (Cestac & Delhomme, 2012). Il est possible que la CCA soit perçue comme un moyen de transport facilitant la mobilité des conducteurs *diminués* physiquement, bien qu'être physiquement et psychologiquement apte à conduire soit requis par la Convention de Vienne (1968), qui restera probablement en vigueur au moment du développement des véhicules complètement automatisés. Ce résultat corrobore le lien entre la recherche de sensations au volant et la conduite avec prise de risque. Il est également cohérent avec les résultats trouvés dans d'autres recherches entre la recherche élevée de sensations et les comportements de prise de risque en conduisant (Cestac *et al.*, 2011 ; Yagil, 2001). Il est aussi possible que ce résultat soit lié à une adaptation comportementale. En effet, utiliser un système de CCA pourrait inhiber les sensations de conduite, diminuant le besoin de contrôle et la responsabilité de la conduite. En conséquence, les conducteurs pourraient anticiper une opportunité de conduire bien qu'ils ne soient pas en état de le faire, ou même l'opportunité de faire une autre tâche que conduire lorsque le système conduit le véhicule lire un journal ou s'occuper des jeunes passagers. Ce résultat souligne l'importance de prévenir les constructeurs et les conducteurs sur les mauvais usages potentiels de la CCA. De plus, il est probable que d'autres types de conducteurs seraient tentés de faire un usage détourné de la CCA (par exemple lorsque le permis de conduire n'est plus valide ou lorsqu'ils ont un handicap ne leur permettant plus de conduire). En effet, si la réglementation le permet, la CCA pourrait être une solution pour les individus qui ne peuvent plus conduire, comme l'ont suggéré des participants des études pilotes. Par exemple, une autorisation médicale pourrait être délivrée pour permettre aux personnes handicapées d'utiliser la CCA dans des conditions spécifiques, afin d'améliorer leur autonomie si la réglementation le permet.

Comparés aux femmes, les hommes ont des attitudes plus positives envers la CCA et des intentions d'utilisation et d'achat plus élevées. Ce résultat est conforme à notre hypothèse (H6). Cependant, lorsque l'acceptabilité contextuelle et l'intérêt à utiliser la CCA en état physique dégradé ont été inclus dans la régression, la variable genre n'a plus été significative.

Les questions sur le niveau d'automatisation désiré n'ont pas donné de résultats significatifs, peut-être parce que les participants n'ont pas pu imaginer précisément les interactions possibles avec le système de conduite automatisée. Il est probable que ces résultats mettent en évidence la difficulté pour les conducteurs d'imaginer ce que pourrait être une voiture complètement automatisée sans l'avoir utilisée. Les difficultés à évaluer l'acceptabilité *a priori* sont ici mises en évidence. En effet, comme la confiance dans les aides avancées à la conduite dépend de la performance et de la fiabilité perçues par les utilisateurs (Maltz *et al.*, 2004 ; Moray *et al.*, 2000 ; Riley, 1994), la confiance dans l'automatisation pourrait avoir une influence sur son évaluation. L'acceptabilité de la CCA pourrait être mieux évaluée après l'avoir essayée ou après l'avoir vue fonctionner, ce qui n'a pas été le cas dans cette première étude. D'autres recherches devraient envisager d'ajouter des images, des vidéos et des démonstrations réelles pour évaluer l'acceptabilité *a priori* de cette technologie peu commune. Les conducteurs pourraient avoir des attitudes et intentions différentes après avoir eu une expérience avec la CCA. En effet, il a été montré qu'utiliser régulièrement une nouvelle technologie pourrait entraîner un phénomène de complaisance à l'égard de l'automatisation (Terrade *et al.*, 2009), défini comme *un état psychologique caractérisé par un faible indice de suspicion* (Wiener, 1981). En d'autres termes, lorsqu'un individu est assisté par un dispositif automatisé et doit passer du rôle de conducteur à celui de surveillant de la conduite, il pourrait rencontrer des difficultés à réagir efficacement si le dispositif dysfonctionne. De prochaines recherches devraient prendre en compte les attitudes et

intentions avant, pendant et après avoir eu une expérience avec la CCA. Utiliser un simulateur de conduite pour évaluer ces dimensions pourrait être une alternative intéressante.

Les implications de cette recherche sont variées. Tout d'abord, l'intérêt d'utiliser la CCA en état physiologique dégradé signifie probablement que les conducteurs ne sont pas encore prêts à maintenir un niveau élevé de contrôle lorsque le pilotage automatique est enclenché (Kaber *et al.*, 1997). En effet, si les conducteurs n'ont plus à conduire, ils pourraient être tentés de moins superviser la conduite, ou encore de ne plus se sentir responsables ni de la voiture ni de la conduite. Il semble fort probable que ce dispositif sera utilisé pour permettre au conducteur de faire autre chose que conduire. Cela est cohérent avec les résultats obtenus par van Driel, Hoedemaeker et van Arem (2007), concernant les embouteillages. La conduite pourrait dès lors être considérée comme une tâche secondaire lorsqu'elle est déléguée, car la limite entre le rôle de passager et de conducteur est floue. De plus, si la responsabilité n'est pas clairement attribuée, d'aucun pourrait considérer être capable d'utiliser la CCA malgré le fait de ne pas être en état de conduire. La seconde implication concerne les conséquences du manque de contrôle ou de l'état physique dégradé lors de l'utilisation de la CCA. Des difficultés pour reprendre le contrôle du véhicule, que ce soit dans des situations d'urgence ou non, pourraient devenir un problème et soulignent un aspect important de la CCA. En effet, les conducteurs délaissant le contrôle pourraient avoir davantage de difficultés à reprendre le contrôle manuel, surtout dans des situations d'urgence et dangereuses (Young *et al.*, 2007). Ainsi, reprendre le contrôle manuel du véhicule lorsque l'on est sorti de la boucle de contrôle pourrait être une manœuvre périlleuse, même si les conducteurs sont en état physique de conduire. Etant donné la potentielle dangerosité de cette nouvelle situation de conduite, il est important d'étudier ce comportement dans le cadre d'une étude sur simulateur. Les législateurs devraient prendre en considération ces résultats pour définir clairement quelles sont les conditions nécessaires pour utiliser la CCA. Les

constructeurs devraient anticiper le risque d'utilisation de cette technologie lorsque les conducteurs ne sont pas en état de l'utiliser, en imposant par exemple la mise en place dans le véhicule de dispositifs de contrôle de l'état du conducteur (certains d'entre eux l'ont déjà inclus dans leurs prototypes, par exemple Piloted Driving System d'Audi).

1.7. Limites de l'étude

Comme dans toute étude par questionnaire, il est possible que le biais de désirabilité sociale, qui fait référence à la perception des répondants de ce qui est correct ou socialement acceptable (Maccoby & Maccoby, 1954), ait influencé les réponses des participants. Cependant, dans cette enquête, les participants n'ont pas été observés lorsqu'ils ont répondu au questionnaire en ligne, ce qui a pu amoindrir cet effet (Leggett, Kleckner, Boyle, Duffield, & Mitchell, 2003). La généralisation de ces résultats n'est pas encore possible, notamment car notre échantillon n'est pas équilibré quant à la répartition des deux genres. En outre, le questionnaire a été en partie diffusé à des mailing listes d'ergonomes, d'ingénieurs et de psychologues, et il n'a pas été possible de déterminer la proportion de cette population particulière. D'habitude familiers dans le domaine de l'interaction homme-machine, ces individus pourraient avoir des attitudes plus positives envers la CCA que la population générale. Toutefois, aucun effet du niveau académique des participants n'a été observé sur les résultats. Les recherches suivantes sur l'acceptabilité de la CCA devraient contrôler ce biais d'échantillon. En outre, l'intérêt des participants pour la technologie n'a pas été évalué dans cette étude. Les technophiles pourraient être plus enthousiastes à l'idée de s'imaginer conduire une voiture complètement automatisée que les autres.

1.8. Perspectives

En définitive, deux tiers des participants ont eu un score moyen supérieur à la valeur centrale de l'échelle d'acceptabilité *a priori* de la conduite complètement automatisée. Bien que les participants n'aient pas pu essayer une telle voiture, ils ont eu des attitudes plutôt

positives à son égard. Cependant, l'intention d'utiliser la CCA est différente d'un environnement de conduite à un autre. Cette dimension est fortement liée aux attitudes envers un tel système, l'acceptabilité contextuelle, l'intérêt de l'utiliser en état physique dégradé et enfin la recherche de sensations au volant. Qui plus est, l'acceptabilité contextuelle a expliqué une partie de l'intention d'utilisation qui n'a pas été entièrement expliquée par les attitudes. Les études suivantes devraient inclure le plaisir de conduire lors de l'examen de l'acceptabilité de la CCA.

Finalement, cette première étude a permis de fournir un outil pour évaluer l'acceptabilité de la CCA pour les recherches futures. De plus, les attitudes et l'acceptabilité *a priori* apparaissent comme des prédicteurs complémentaires de l'intention d'utiliser la CCA. Attitudes et intentions d'utilisation pourraient avoir des conséquences sur la performance de la conduite automatisée, notamment vis-à-vis de la reprise de contrôle du véhicule qui est une nouvelle manœuvre. Enfin, les constructeurs devraient prendre en considération qu'il y a un risque potentiel de mauvais usage de cette technologie qui devrait être anticipé lors des phases de conception et développement de la CCA.

2. Etude 2 : Impact de la pratique et de la confiance sur la reprise de contrôle manuel d'une voiture complètement automatisée sur simulateur

Cette étude a été valorisée par un article (Payre, Cestac, & Delhomme, in press) ainsi qu'une communication (Payre, Cestac, & Delhomme, 2014, July).

2.1. Introduction

L'objectif de cette deuxième étude est de mesurer l'impact d'une courte pratique sur la performance de la reprise de contrôle manuel. L'une des compétences sollicitées lors de l'apprentissage de l'utilisation de la CCA est le maniement du véhicule, comme c'est le cas pour la conduite manuel d'après la matrice GDE (Hatakka, *et al.*, 2002). Ainsi, la pratique des reprises de contrôle manuel est considérée comme un apprentissage de base de la CCA et sera examinée dans cette étude.

Bien que l'on puisse considérer que plus un conducteur s'exerce à pratiquer une manœuvre meilleures seront ses performances, la question serait de connaître la quantité et la qualité d'entraînement nécessaire pour améliorer les compétences de reprise de contrôle manuel. Dans cette étude, nous allons tester l'efficacité d'une session de courte pratique suivie par des conducteurs non-professionnels utilisant la CCA pour la première fois. Cette situation pourrait correspondre à une situation d'interaction typique, une première prise en main par exemple, lors de l'acquisition d'une voiture complètement automatisée, et donc de l'utilisation de ce type de véhicule pour la première fois.

La présente étude examine l'impact de la confiance dans la CCA et la pratique de la CCA sur les reprises de contrôle manuelles anticipées ou urgentes dans un simulateur de conduite. La reprise de contrôle manuel de la conduite dans une situation pouvant être perçue comme dangereuse sera également examinée. Pour cette raison, la question du comportement en mode de CCA est traitée en analysant les effets de la pratique et de la confiance sur le temps de réponse dans des situations anticipées et urgentes.

2.2. Méthode

2.2.1. Matériel

Le simulateur statique de conduite de l'IFSTTAR a été utilisé pour cette étude (Figure 11). Il est composé de dix écrans rectangulaires (2.44 m X 1.83 m) ainsi que d'un véhicule instrumenté (Peugeot 308).

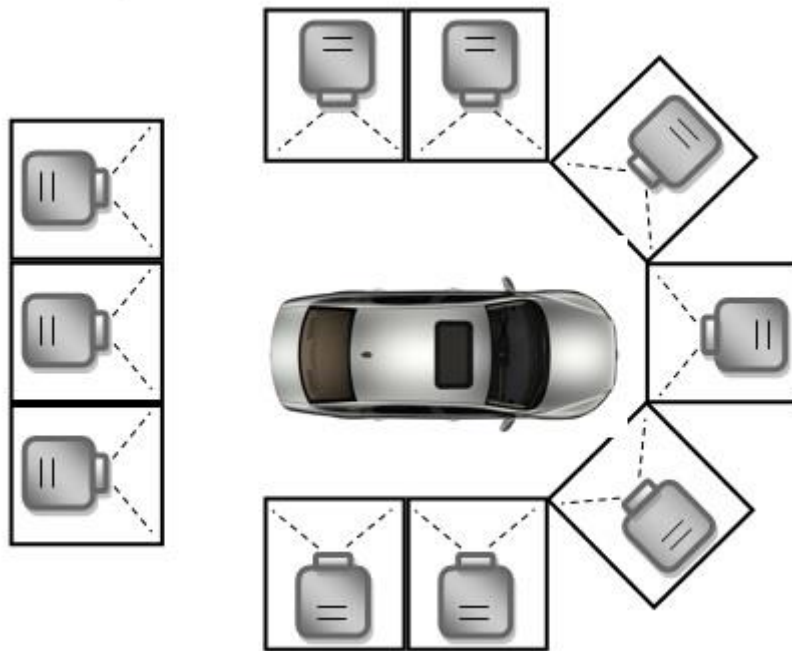
Figure 11 : Le simulateur de conduite de l'IFSTTAR, à Satory



Le véhicule instrumenté est positionné au centre de ces dix écrans dont trois se situent en face du conducteur, alors que trois autres se situent à l'arrière du véhicule (Figure 12). La vision arrière latérale est assurée par deux écrans fixes installés de chaque côté du véhicule. Le taux de rafraichissement de tous ces écrans est de 60Hz. L'automobiliste a la possibilité de

voir à 360°. Différents paramètres (vitesse, accélération, freinage, mouvements du volant, etc.) sont enregistrés en accord avec la situation de trafic virtuelle à laquelle l'automobiliste est exposé. Une tablette, fixée sur le tableau de bord entre les deux sièges avant, est utilisée afin d'afficher des messages et consignes, diffusés aussi de manière sonore.

Figure 12 : Vue du dessus du simulateur de l'IFSTTAR



Dans le cadre de cette recherche, un programme informatique simulant la conduite complètement automatisée a été développé par le laboratoire LEPSIS de l'IFSTTAR.

2.2.2. Participants

Au total, 69 conducteurs (37 hommes) ayant un permis B valide ont pris part à l'étude, pour laquelle ils ont reçu une compensation financière de 30 €. Les participants ont été recrutés via une annonce déposée sur un site internet traitant des sciences et disposant d'une section de recrutement de participants. Deux questionnaires ont été remplis par tous les participants, un avant et un après avoir utilisé le simulateur. L'âge moyen de l'échantillon est

38.5 ans, $SD = 14.9$, Min = 1, Max = 51 ; ils ont tous répondu au questionnaire en août 2013 et ont parcouru en moyen 304 km la semaine précédant les réponses aux questionnaires, $SD = 627$, Min = 0, Max = 5000. Les participants ont réalisé l'étude individuellement et anonymement. Ils ont été répartis également dans les deux groupes (pratique simple vs. pratique élaborée) en fonction de leur âge et de leur genre.

2.2.3. Procédure

Les participants ont été mis en situation par l'expérimentateur avant le début de l'étude. Il leur a été dit qu'ils allaient participer à une étude sur la CCA et qu'ils auraient à réaliser trois tâches : répondre à un questionnaire informatisé, conduire dans un simulateur, et répondre à un second questionnaire informatisé. Ils ont été informés être libres d'arrêter l'étude à tout moment. Toutefois, aucune passation n'a été stoppée.

Dans le questionnaire pré-expérimental, les caractéristiques de la voiture complètement automatisée ont été décrites : *On parle de conduite automatisée lorsque l'automobiliste est dans un véhicule dont les fonctions de pilotage sont prises en charge par un système informatique. Ce système est capable de gérer la vitesse, les distances vous séparant des autres véhicules, la trajectoire, le freinage et les dépassements. Les voitures ayant un système de conduite automatisé sont homologuées afin de pouvoir être utilisées par tous les automobilistes. Toutefois, les automobilistes restent responsables du véhicule et doivent se tenir face au volant avec leur ceinture de sécurité.* Ensuite, il leur était demandé de confirmer qu'ils avaient bien compris ce qu'était la CCA. Si tel était le cas, ils pouvaient commencer à répondre au questionnaire pré-expérimental.

Ensuite, les participants ont été emmenés dans le simulateur pour se familiariser avec les commandes du véhicule et les sensations d'une conduite sur simulateur. Cette étape de familiarisation avec le simulateur dure 3 min et se déroule sur une autoroute deux fois deux

voies avec un terre-plein central. Il y a de la circulation régulière et fluide sur les deux voies d'en face. Le véhicule est équipé d'une boîte automatique. L'objectif est que les participants soient à l'aise avec le simulateur et comprennent son fonctionnement. :

- Démarrage manuel du véhicule. L'automobiliste accélère jusqu'à une vitesse de 130 km/h, un panneau indique cette limite de vitesse. 30 secondes après le démarrage, un premier virage léger sur la droite précède un virage un peu plus sec sur la gauche. 10 secondes après la sortie du virage, un véhicule sur la file de droite roule à environ 90 km/h. Libre aux participants de le dépasser ou non. Après quelques virages et courtes lignes droites, un panneau *Vous pouvez vous arrêter* apparaît. Arrêt du véhicule.

La deuxième étape est la phase de pratique du système de conduite complètement automatisée, avec la consigne suivante :

- *Le véhicule que vous allez conduire est un véhicule automatisé. Lorsque le pilotage automatique est activé, vous n'avez besoin de toucher ni le volant, ni les pédales pour que le véhicule avance. Il gère les dépassements, l'accélération, le freinage, et les interactions avec les autres véhicules. Pour enclencher le pilotage automatique, vous devez faire un appel de phares (l'expérimentateur fait le geste et invite les participants à le réaliser ; un feedback auditif et visuel sur le tableau de bord permet de confirmer l'activation du système). Pour reprendre le contrôle manuel de la voiture, il vous suffit de tourner très légèrement le volant, ou d'appuyer très légèrement sur la pédale d'accélération, le frein ou encore de faire un appel de phare.*

Ensuite, les participants sont distribués dans l'une ou l'autre des conditions expérimentales, à savoir la pratique simple ou élaborée, décrites dans le Tableau 14 :

Tableau 14 : Description des deux différentes pratiques et du scenario commun

Type de pratique			Durée
	Pratique simple	Pratique élaborée	
Pratique (130 km/h)	Conduit manuelle jusqu’à 130 km/h	Conduite manuelle jusqu’à 130 km/h	3 min
	Activation de la CCA	Activation de la CCA	
		Etre dépassé par une voiture	
		Dépasser une voiture	
		Reprise de contrôle manuel rapide et anticipée	
		Activation de la CCA	
	Reprise de contrôle manuel	Reprise de contrôle manuel	
Scenario commun (130 km/h)	Conduite manuelle jusqu’à 130 km/h (étape 1)		18 min
	Activation de la CCA (étape 2)		
	Etre dépassé par une voiture (étape 3)		
	Dépasser une voiture (étape 4)		
	Freiner (étape 5)		
	Accélérer		
	Négocier des virages		
	Reprise de contrôle manuel (étape 6)		
	Activation de la CCA (étape 7)		
	Situation dangereuse (queue de poisson)		
	Pas d’évènement (2 min)		
	Situation d’urgence (panne du système) (étape 8)		
	Reprise de contrôle manuel urgente		
	Activation la CCA (étape 9)		
	Reprise de contrôle manuel (étape 10)		

Note : Le texte en gras correspond au mode de conduite complètement automatisée, alors que le texte non-gras correspond au mode de conduite manuelle.

Chronologie des évènements en fonction des groupes :

Groupe ayant suivi la pratique simple (durée : 3 min) :

1. Le participant démarre manuellement le véhicule et accélère pour atteindre la vitesse de 130km/h. Après une dizaine de secondes à rouler à 130km/h, déclenchement de la voix et des messages sur la tablette : *Veillez rouler à 130 km/h*, suivi d'*Entrée en zone de pilotage automatique imminente* puis, 5 secondes après *Veillez activer le pilotage automatique*. Le participant active le pilotage automatique en réalisant un

appel de phares. Le message *Pilotage automatique activé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette.

2. Après une quinzaine de secondes en pilotage automatique en ligne droite, le véhicule se range sur la file de droite s'il n'y est pas. Il y a des virages légers sur l'autoroute, ainsi que de courtes lignes droites, le véhicule automatisé négocie parfaitement les trajectoires.
3. Au bout de 3 minutes, déclenchement de la voix et du message sur la tablette : *Fin de zone de pilotage automatique imminente*. 5 secondes plus tard, la voix et la tablette indiquent *Fin de zone de pilotage automatique, Veuillez reprendre le contrôle du véhicule*. Le conducteur reprend le contrôle manuel du véhicule roulant à 130km/h en manipulant soit le volant soit les pédales, soit en faisant l'appel de phares. Dans tous les cas, le pilotage automatique est désactivé automatiquement après la diffusion du dernier message *Veuillez reprendre le contrôle du véhicule*. On demande au participant de ralentir et d'arrêter le véhicule. Fin de la phase de familiarisation pour ce groupe.

Groupe ayant suivi la pratique élaborée (durée : 3 min) :

1. Le participant démarre manuellement le véhicule et accélère pour atteindre la vitesse de 130km/h. Après une dizaine de secondes à rouler à 130km/h, déclenchement de la voix et des messages sur la tablette : *Veuillez rouler à 130 km/h*, suivi d'*Entrée en zone de pilotage automatique imminente* puis, 5 secondes après *Veuillez activer le pilotage automatique*. Le participant active le pilotage automatique en réalisant un appel de phares. Le message *Pilotage automatique activé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette.
2. Après une quinzaine de secondes en pilotage automatique en ligne droite, le véhicule se range sur la file de droite s'il n'y est pas. Il y a des virages légers sur l'autoroute,

ainsi que de courtes lignes droites, le véhicule automatisé négocie parfaitement les trajectoires.

3. Un véhicule plus rapide arrive sur la file de gauche et dépasse le véhicule automatisé (VA) du participant.
4. 30 secondes après avoir été dépassé, un véhicule plus lent roulant à 90km/h apparaît sur la file de droite. A 150 mètres du véhicule (distance équivalente à 8 longues bandes blanches du côté de la bande d'arrêt d'urgence), une voix annonce *Dépassement imminent*. Le même message s'affiche sur la tablette. Lorsque le VA est à 78 mètres de la voiture à dépasser (quatre bandes d'arrêt d'urgence), le VA dépasse la voiture en s'insérant dans la file de gauche, puis se rabat lorsqu'il l'a dépassée de 38 mètres (deux bandes d'arrêt d'urgence).
5. Après 30 secondes, une voix annonce *Le système va bientôt être désactivé, veuillez reprendre le contrôle*. Le même message apparaît sur la tablette. Au bout de 5 secondes, une alarme sonne trois fois lorsque le pilotage automatique se désactive. Le participant reprend le contrôle du véhicule.
6. Après une dizaine de secondes à rouler en mode manuel, déclenchement de la voix et des messages sur la tablette *Veillez rouler à 130 km/h* puis *Entrée en zone de pilotage automatique imminente*, suivi de *Veillez activer le pilotage automatique*. Ce message s'affiche également sur la tablette. Action réalisée par le participant via un appel de phares : entrée en pilotage automatique. Le message *Pilotage automatique activé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette.
7. Au bout de 30 secondes, déclenchement de la voix et du message sur la tablette : *Fin de zone de pilotage automatique imminente*. 5 secondes plus tard, la voix et la tablette indiquent *Fin de zone de pilotage automatique, Veuillez reprendre le contrôle du véhicule*. Le conducteur reprend le contrôle manuel du véhicule roulant à 130km/h en

manipulant soit le volant, soit les pédales, soit en faisant l'appel de phares. Dans tous les cas, le pilotage automatique est désactivé automatiquement après la diffusion du dernier message *Veillez reprendre le contrôle du véhicule*. On demande au participant de ralentir et d'arrêter le véhicule. Fin de la phase de familiarisation pour ce groupe.

Scénario commun en dix étapes (durée : 18 min) :

Etape 1 : conduite manuelle pour amorcer le pilotage automatique (durée : 1 min 30)

Le participant démarre le véhicule manuellement pour atteindre la vitesse de 130km/h en 5^{ème} vitesse.

Etape 2 : transition pilotage manuel à pilotage automatique (durée : 30 secs)

Après une dizaine de secondes à rouler à 130km/h, déclenchement de la voix et des messages sur la tablette : *Veillez rouler à 130 km/h*, suivi d'*Entrée en zone de pilotage automatique imminente* puis, 5 secondes après *Veillez activer le pilotage automatique*. Le participant active le pilotage automatique en réalisant un appel de phares. Le message *Pilotage automatique activé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette.

Etape 3 : premières expériences en pilotage automatique (durée : 1 min)

Après une quinzaine de secondes en pilotage automatique en ligne droite, le véhicule se range sur la file de droite s'il n'y est pas. Il y a un virage sur l'autoroute, le véhicule automatisé le négocie. Un véhicule dépasse la voiture automatisée sur la file de gauche et se rabat sur la file de droite.

Etape 4 : première manœuvre délicate en pilotage automatique (durée : 1 min)

Une dizaine de secondes après que le participant ait été dépassé, le véhicule sur la file de droite se rapproche. A 150 mètres du véhicule (distance équivalente à 8 longues bandes blanches du côté de la bande d'arrêt d'urgence), une voix annonce *Dépassement imminent*. Le même message s'affiche sur la tablette. Lorsque le VA est à 78 mètres de la voiture à dépasser (quatre bandes d'arrêt d'urgence), le VA dépasse la voiture en s'insérant dans la file de gauche, puis se rabat lorsqu'il l'a dépassée de 38 mètres (deux bandes d'arrêt d'urgence).

Transition avant étape suivante : 1 minute sans événement particulier

Etape 5 : première situation de freinage en pilotage automatique (durée : 1 min 30)

Un véhicule sur la file de droite est dans le champ de vision. Le véhicule se rapproche. Arrivé à 38 mètres du véhicule, ce dernier freine légèrement et le VA réalise un freinage. En gardant la même distance de sécurité mais avec une allure réduite, la voix annonce *Dépassement imminent*. Le même message s'affiche sur la tablette. Le VA dépasse le véhicule voiture en s'insérant dans la file de gauche, puis se rabat lorsqu'il l'a dépassée d'environ 20 mètres.

Transition avant étape suivante : 1 minute sans événement particulier

Etape 6 : reprise de contrôle du pilotage en condition normale (durée : 1 min)

La voix et la tablette diffusent le message *Fin de zone de pilotage automatique imminente*. 5 secondes plus tard, la voix et la tablette indiquent *Fin de zone de pilotage automatique, Veuillez reprendre le contrôle du véhicule*. Le conducteur reprend le contrôle manuel du véhicule roulant à 130km/h en manipulant soit le volant soit les pédales, soit en faisant l'appel de phares. Dans tous les cas, le pilotage automatique est désactivé automatiquement après la diffusion du dernier message *Veuillez reprendre le contrôle du véhicule*.

Etape 7 : perception d'une situation de danger en pilotage automatique (durée : 3 min)

Après une minute à rouler à 130km/h manuellement, déclenchement de la voix et du message sur la tablette : *Veillez rouler à 130 km/h*, suivi d'*Entrée en zone de pilotage automatique imminente* puis, 5 secondes après, *Veillez activer le pilotage automatique*. Le participant active le pilotage automatique en réalisant un appel de phares. Le message *Pilotage automatique activé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette.

Une dizaine de secondes après la délégation de la conduite, un véhicule sur la file de droite est en vue. Une voix annonce *Dépassement imminent*. Le même message s'affiche sur la tablette. Lorsque le VA est à environ 38 mètres de la voiture à dépasser, il dépasse la voiture en s'insérant dans la file de gauche. Le VA n'a pas vu qu'il y avait un autre véhicule devant la voiture dépassée. Ce véhicule déboîte quand le dépassement est en cours.

Deux possibilités :

- Le VA ralentit et freine à temps, termine le dépassement en suivant le véhicule qui a déboité. Il se remet enfin sur la file de droite.
- Le conducteur reprend le contrôle manuel du véhicule et termine lui-même la manœuvre

Transition avant étape suivante : 1 minute sans évènement particulier

Etape 8 : dysfonctionnement du système de pilotage automatique (durée : 3 min)

Le VA est toujours en pilotage automatique depuis l'étape 7. Si le participant a repris le contrôle, il faut le remettre en pilotage automatique (cf. Etape 2). En pilotage automatique, le véhicule se met sur la file de droite. Au bout de 2 min, le système de pilotage automatique se coupe (panne). Une alarme se déclenche pour prévenir de l'arrêt du système de pilotage automatique : voix et message sur la tablette *Panne du système*. Le véhicule n'est plus sous

contrôle, la direction n'est plus prise en charge et la véhicule décélère progressivement, le conducteur doit le reprendre. Il n'est pas explicitement demandé au conducteur de reprendre le contrôle.

Etape 9 : après la reprise de contrôle forcée, passage en pilotage automatique (durée : 2 min)

Une minute après la panne, déclenchement de la voix et du message sur la tablette : *Veillez rouler à 130 km/h*, suivi d'*Entrée en zone de pilotage automatique imminente* puis, 5 secondes après *Veillez activer le pilotage automatique*. Le participant active le pilotage automatique en réalisant un appel de phares. Le message *Pilotage automatique activé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette.

Etape 10 : reprise de contrôle manuel pour sortir de l'autoroute (durée : 3 min)

Une minute après que le pilotage automatique a été activé, déclenchement de la voix et du message sur la tablette : *Fin de zone de pilotage automatique imminente*. 5 secondes plus tard, la voix et la tablette indiquent *Fin de zone de pilotage automatique, Veillez reprendre le contrôle du véhicule* suivis de *Veillez quitter l'autoroute à la prochaine sortie*. Le conducteur reprend le contrôle manuel du véhicule roulant à 130km/h en manipulant soit le volant soit les pédales, soit en faisant l'appel de phares. Dans tous les cas, le pilotage automatique est désactivé automatiquement après la diffusion du dernier message *Veillez reprendre le contrôle du véhicule*. Après être sortie de l'autoroute, un panneau *Terminé* est affiché à côté de la route.

A la fin de l'étude, les participants ont répondu au second questionnaire sur ordinateur. Ils ont ensuite participé à un court entretien semi-directif sur les impressions générales qu'ils avaient ressenties pendant l'étude.

2.3. Mesures

2.3.1. Description de l'ensemble des mesures enregistrées au cours de l'étude 2

Dans le questionnaire pré-expérimental, les participants ont répondu à l'échelle d'acceptabilité de la CCA (Payre *et al.*, 2014), $\alpha = .79$, suivie de questions sur le genre, l'âge, l'année d'obtention du permis B et le nombre de kilomètres parcourus la semaine précédant l'étude. L'échelle d'acceptabilité de la CCA est composée de deux dimensions, l'acceptabilité contextuelle et l'intention à utiliser la CCA en état physique dégradé.

Dans le questionnaire post-expérimental, l'échelle d'acceptabilité a été à nouveau utilisée. Sa consistance interne est acceptable, $\alpha = .79$. Ensuite, les participants ont répondu à des questions sur la confiance présentées aléatoirement, $\alpha = .82$ (6 items) : *De manière générale, j'ai confiance dans le système de conduite automatisée ; De manière générale, j'ai confiance dans mes capacités à reprendre le contrôle manuel du véhicule en cas de besoin ; J'ai confiance dans le système de conduite automatisé pour dépasser; J'ai confiance dans le système de conduite automatisé pour maintenir la trajectoire; J'ai confiance dans le système de conduite automatisé pour éviter les obstacles ; J'ai confiance dans le système de conduite automatisé pour maintenir la distance avec le véhicule de devant.* Une échelle de Likert en 7 point a été utilisée, allant de 1 : *Pas du tout d'accord* à 7 : *Tout à fait d'accord*.

La performance mesurée est le temps de réponse (en secondes), à partir du moment où le signal d'alarme est déclenché (message sonore et visuel) jusqu'au premier incrément fait par le participant, que ce soit sur le volant, l'accélérateur ou le frein. Tous les temps de réponse des RCM ont été mesurés alors que la vitesse du véhicule est de 130 km/h.

Dans notre échantillon, 13 fichiers enregistrés de participants sur le simulateur ont été affectés par une perte partielle de données (6 avant la première RCM anticipée, 9 avant la

RCM d'urgence, et 13 avant la deuxième RCM anticipée). Cependant, tous ont pu réaliser le scénario en entier, donc toutes les données collectées ont été incluses dans l'analyse puisqu'il n'y a pas eu d'erreurs de mesure et que les participants font tous partie de notre population d'intérêt (Orr, Sackett, & DuBois, 1991).

Une mesure physiologique oculométrique a été mise en place. Un oculomètre SMI de type porté a été utilisé afin de mesurer le diamètre pupillaire et le *PERCLOS* (pourcentage de paupières fermées). Le diamètre pupillaire est un indicateur d'anxiété, le *PERCLOS* un indicateur d'endormissement. La fréquence d'enregistrement est de 60Hz. Toutefois, étant donnée l'importance des pertes de données pour chaque fichier enregistré par participant (dues au port de lunettes, au maquillage, à la luminosité, à la fixation instable de la casquette-oculomètre sur la tête des participants), ces mesures n'ont pas pu être exploitées, malgré les pré-tests réalisés (voir Annexes 2.2.).

Enfin, les questions suivantes ont été posées pour les débriefings semi-directifs à la fin de chaque passation pour recueillir les impressions des participants sur la conduite complètement automatisée :

- *Quelles sont vos impressions sur la CCA ?*
- *Vous êtes-vous senti(e) à l'aise ?*
- *Vous êtes-vous senti(e) dérouté(e) ?*
- *Avez-vous eu peur ?*
- *Quels sont, selon vous, les avantages de ce type de système ?*
- *Quels sont, selon vous, les inconvénients de ce système ?*
- *Pouvez-vous donner trois mots pour définir la CCA ?*
- *Est-ce que vous vous sentiriez capable d'utiliser la CCA après cette étude ?*

- *Que pensez-vous du futur de la CCA ? Selon vous, dans quelle mesure cette technologie va se développer ?*

Les résultats de ces questions sont traités dans le cadre d'un article en cours d'écriture et n'apparaissent pas dans la présente thèse (Payre, Cestac & Delhomme, manuscrit en préparation).

2.3.2. Synthèse des mesures exploitées de l'étude 2

La reprise de contrôle est réalisée en condition normale et en condition d'urgence. La pratique est une variable indépendante à deux modalités : pratique simple vs. pratique élaborée. Deux mesures des attitudes sont relevées : l'acceptabilité *a priori* et *a posteriori*, mesurées avec l'échelle de la première étude ; et la confiance dans le système de conduite automatisée, mesurée après interaction avec ce dernier. Les intentions d'utilisation seront également recueillies. Nous cherchons à savoir si les attitudes et les intentions mesurées ont une influence sur la performance de reprise de contrôle manuel.

2.4. Hypothèses opérationnelles

Les conducteurs ayant un faible niveau de confiance dans la CCA vont reprendre le contrôle dans une situation perçue comme dangereuse (Lee *et al.*, 1992) (H1). Etant donné qu'ils pratiqueront de plus nombreuses reprises de contrôle manuel (RCM), les conducteurs ayant suivi la pratique élaborée réagiront plus rapidement en situation anticipée et d'urgence que ceux ayant suivi la pratique simple (Hoc *et al.*, 2009, 2006) (H2). Concernant la complaisance, à cause de la surconfiance, les conducteurs avec un niveau élevé de confiance dans la CCA reprendront le contrôle manuel plus lentement que ceux qui ont un niveau de confiance faible ou modéré dans la CCA (Parasuraman *et al.*, 1997) (H3). Pour finir, une interaction entre l'effet de la pratique et la confiance est attendue. La pratique élaborée

modèrera les effets négatifs de la surconfiance et de la sous-confiance dans la CCA car la confiance dans cette condition est mieux calibrée (Lee *et al.*, 1992) (H4).

Pour tester ces quatre hypothèses, les participants ont été distribués aléatoirement dans les conditions expérimentales (pratique simple vs. élaborée) pour équilibrer les groupes en termes d'âge et de genre.

2.5. Résultats

2.5.1. Analyse descriptive de l'acceptabilité de la CCA

Il n'y a pas eu de différence significative, $F(1,68) = 0.5, p = .83$, entre les deux scores moyens de la dimension d'acceptabilité contextuelle de la CCA, mesurée avant ($M = 4.4, SD = 1.4, \text{Min} = 1, \text{Max} = 7$) et après interaction ($M = 4.8, SD = 1.4, \text{Min} = 1, \text{Max} = 7$) avec le système.

Concernant l'intérêt porté à l'utilisation du système en condition physique dégradée, il y a eu une baisse significative, $F(1,66) = 4.8, p < .05, \eta^2 = .07$, entre les scores moyens de cette dimension mesurée avant ($M = 5.2, SD = 2, \text{Min} = 1, \text{Max} = 7$) et après interaction ($M = 4.8; SD = 2.1, \text{Min} = 1, \text{Max} = 7$) avec le système. Deux participants n'ont pas répondu aux items de cette dimension dans la mesure où le choix *non concerné(e)* était proposé.

Enfin, les participants ont eu un score relativement élevé sur l'échelle d'acceptabilité de la CCA qui inclut les deux dimensions, que ce soit avant ($M = 4.8 ; SD = 1.3, \text{Min} = 1.4, \text{Max} = 7$) ou après ($M = 4.6 ; SD = 1.4, \text{Min} = 1.5, \text{Max} = 7$) interaction avec le système.

2.5.2. Analyses descriptives et inférentielles des temps de réponse de la reprise de contrôle manuel

Les conducteurs ont repris le contrôle manuel plus rapidement lors de la deuxième RCM anticipée que lors de la première, $F(1,54) = 584, p < .001, \eta^2 = .92$ (Tableau 15). Cette

amélioration du temps de réponse pourrait être expliquée par le fait que les participants ont mieux compris comment le système fonctionnait, les amenant à reprendre le contrôle avant que l'intégralité des messages ne soit diffusée.

Les temps de réponse moyens en situation d'urgence ont été plus rapides que les deux temps de réponse moyens lors des RCM anticipées (voir Tableau 15). Comparés aux temps de réponse moyens en situation d'urgence, les temps de réponse moyens lors de la première RCM anticipée ont été plus longs, $F(1,56) = 141.9, p < .001, \eta^2 = .72$. De manière similaire, comparés aux temps de réponse moyens en situation d'urgence, les temps de réponse moyens lors de la seconde RCM anticipée (lorsqu'il a été demandé aux participants de quitter l'autoroute) ont été également plus longs, $F(1,51) = 40.1, p < .001, \eta^2 = .44$.

Tableau 15 : Temps de réponse moyens pour les trois reprises de contrôle (en secondes).
Echantillon total.

	<i>Première RCM anticipée N=63</i>	<i>RCM d'urgence N=60</i>	<i>Seconde RCM anticipée N=56</i>
<i>M</i>	8.7	4.3	6.8
<i>Med</i>	8.1	4.1	7.2
<i>SD</i>	2.7	1.2	2.5
<i>Min</i>	3.6	2	2.7
<i>Max</i>	15.2	8	13.9

Note: Il manque des données pour la première RCM anticipée (n=6), la RCM d'urgence (n=9) et la seconde RCM anticipée MCR (n=13).

2.5.3. *Impact de la confiance et de la pratique sur les reprises de contrôle manuel*

Les participants ont eu un score relativement élevé à l'échelle de confiance de la CCA, $\alpha = .82$, mesurée après avoir interagi avec le système, $M = 5.23$ ($SD = 1$, $Min = 2.83$, $Max = 7$). Il n'y a pas eu de différence significative, $F(1,67) = 3.3, p = .07$ entre les groupes pratique simple et pratique élaboré (Tableau 16).

Vis-à-vis de la situation dangereuse, une voiture déboîte de manière inattendue devant le véhicule du participant alors que celui-ci est en train de dépasser un autre véhicule, 6 participants sur 69 (8.7%) ont repris le contrôle. Il n'y a pas eu de corrélation significative, $r = -.15$, $p = .22$, entre le niveau de confiance et la réalisation d'une RCM lors de cette situation potentiellement dangereuse (H1).

Pour les participants de la condition pratique simple, lors de la situation d'urgence, une corrélation positive, $r = .63$, $p < .001$, a été observée entre le niveau de confiance dans la CCA et le temps de réponse moyen de la RCM (Tableau 16). Ce résultat indique un effet négatif d'un niveau de confiance élevé sur le temps de réponse de la RCM dans cette condition (H2). Une telle corrélation n'a pas été observée pour les participants de la condition pratique élaborée (Tableau 16).

Aucun des temps de réponse moyens lors des deux RCM anticipées n'a été significativement influencé par la pratique (pour la première MCR anticipée, $F(1,61) = .63$, $p = .43$, pour la seconde MCR anticipée, $F(1,54) = .08$, $p = .77$) ou le niveau de confiance (Tableau 16) (H3).

Concernant la situation d'urgence, il n'y a pas eu de différence significative observée, $F(1,58) = 1.16$, $p = .29$, pour les temps de réponse moyen de la RCM entre les participants de la condition de pratique simple et élaborée (Tableau 16).

Tableau 16 : Impact de la confiance et de la pratique sur les reprises de contrôle manuel

	<i>M</i>		<i>SD</i>		<i>Simple</i>			<i>Elaborée</i>		
	<i>Simple</i>	<i>Elaborée</i>	<i>Simple</i>	<i>Elaborée</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1. Temps de réponse 1 ^{ère} RCM	8.97	8.42	2.89	2.55						
2. Temps de réponse RCM urgence	4.43	4.09	1.21	1.23	.23			.00		
3. Temps de réponse 2 ^{ème} RCM	6.93	6.74	2.59	2.39	.71**	.00		.54**	.02	
4. Confiance dans la CCA	5.03	5.47	.86	1.14	.25	.63**	.08	.11	-.08	.16

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$, RCM = Reprise de contrôle manuel, CCA = Conduite complètement automatisée

Lorsqu'ils sont inclus séparément dans la régression linéaire hiérarchique, les scores centrés-réduits de la pratique n'ont pas d'impact sur le temps de réponse de la RCM en cas d'urgence, alors que les scores centrés-réduits de la confiance dans la CCA en ont un (Tableau 17). De plus, il y a un effet d'interaction entre ces deux dimensions sur la RCM, $t(59) = -3.2$, $p < .01$. Pour les participants ayant suivi la condition de pratique simple, plus la confiance déclarée est élevée, plus les temps de réponse sont longs. Ainsi, les effets négatifs d'un important niveau de confiance sur les temps de réponse de la RCM en situation d'urgence seraient modérés dans la condition pratique élaborée (H4).

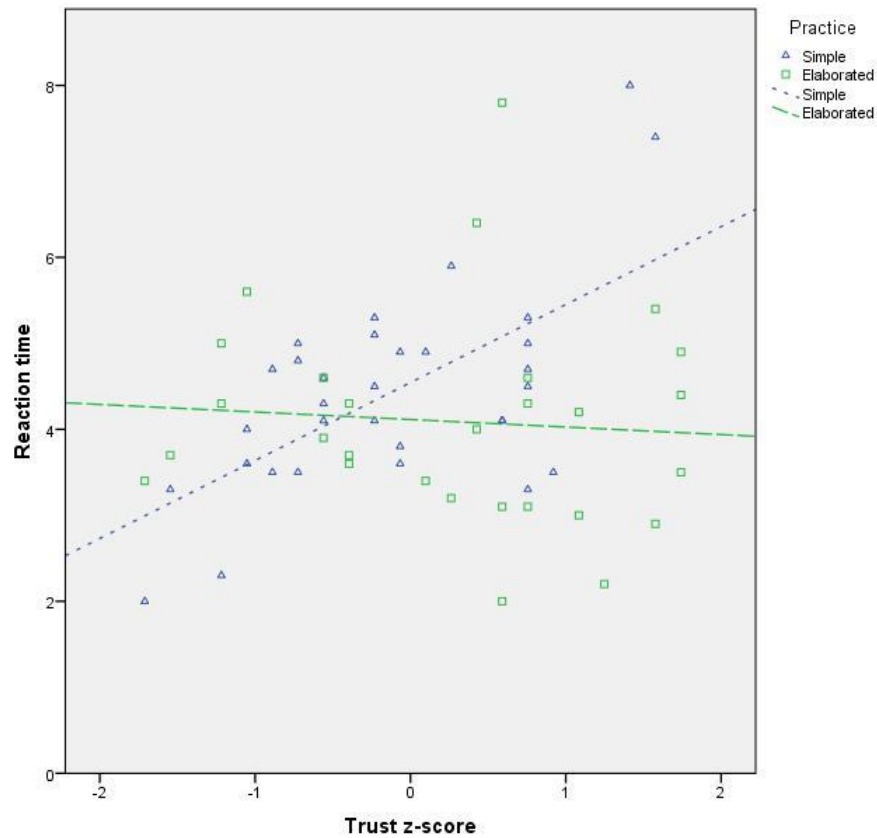
Tableau 17 : Régression linéaire hiérarchique de l'impact de la pratique et de la confiance (centrée) sur le temps de réponse lors d'une reprise de contrôle urgente ($N = 60$).

	<i>R² ajusté</i>	<i>ΔR²</i>	Etape 1	Etape 2
<i>Etape 1</i>	.05			
Pratique			-.20	-.18
Confiance dans la CCA			.26*	.35**
<i>Etape 2</i>	.19	.14**		
Confiance dans la CCA x Pratique				-.39**

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$; ΔR^2 : variation de R^2

L'impact négatif de la confiance sur le temps de réponse ainsi que l'interaction entre la confiance et la pratique sont présentés dans la Figure 13.

Figure 13 : Interaction entre la pratique et la confiance sur le temps de réponse (en s)



Les hommes ont eu plus confiance dans la CCA que les femmes, $F(1,67) = 10.27$, $p < .01$, $\eta^2 = .13$. Cependant, il n'y a pas eu d'effet du genre sur les trois temps de réponses des RCM.

2.6. Résumé des principaux résultats de l'étude 2

Résumé des principaux résultats de l'étude 2 : 69 conducteurs avec un permis B valide ont pratiqué sur autoroute la conduite complètement automatisée (CCA) sur simulateur. Ils ont été répartis dans deux conditions : pratique simple et pratique élaborée afin de se familiariser avec le système de pilotage automatique. Concernant la reprise de contrôle manuel en situation d'urgence (panne du système), une corrélation positive a été trouvée entre la confiance dans le système et le temps de réponse pour le groupe ayant suivi une pratique simple (plus la confiance est élevée, plus le temps de réponse est long), ce qui n'est pas le cas pour le groupe ayant suivi une pratique élaborée. Ce résultat indique que pour diminuer l'impact négatif de la confiance élevée sur le temps de réponse lors de la reprise de contrôle manuel, une pratique appropriée de la CCA pourrait être nécessaire.

2.7. Discussion

L'objectif général de l'étude 2 a été d'examiner l'impact de la confiance et de la pratique sur la performance de reprise de contrôle manuel lors de l'utilisation de la conduite complètement automatisée (CCA). Un impact négatif d'un haut niveau de confiance dans la CCA sur un aspect de la performance de conduite (temps de réponse de la reprise de contrôle manuel) dans une situation d'urgence a été observé pour les participants de la condition pratique simple de la CCA. Toutefois, la reprise de contrôle manuel est un des aspects de la performance de la CCA. D'autres recherches devraient prendre en considération davantage de paramètres, comme la qualité de la reprise de contrôle manuel, le contrôle du véhicule et la sûreté des manœuvres.

La CCA a été globalement acceptée a priori et a posteriori. Toutefois, une baisse du score moyen de la dimension d'intention d'utilisation en état dégradé après interactions avec le système montre que les conducteurs sont moins enclins à utiliser cette technologie lorsqu'ils ne sont pas en état de s'en servir. Ce résultat pourrait être expliqué par la perception de la difficulté plus importante à reprendre le contrôle manuel du véhicule lorsque l'on n'est pas apte à conduire, d'après la théorie de l'homéostasie de la difficulté perçue de la tâche (Fuller, 2005).

La première hypothèse n'a pas été confirmée : reprendre le contrôle manuel dans une situation potentiellement dangereuse (déboitement) n'a pas été significativement influencée par le niveau de confiance dans le système (H1). Ce résultat pourrait être expliqué par le faible niveau de dangerosité perçu par les participants lors de cette situation. La deuxième hypothèse a également été réfutée : la pratique n'a pas eu d'effet simple sur le temps de réponse pour la reprise de contrôle manuel, que ce soit dans les situations anticipées ou d'urgence (H2). Il pourrait être avancé que le scénario commun était une opportunité pour les deux groupes d'apprendre davantage sur la manière d'utiliser le système de CCA. Ce scénario a peut-être permis de compenser la différence de pratique entre les deux conditions. Cependant, comme prévu, un niveau de confiance élevé a été corrélé positivement avec le temps de réponse de la RCM dans la situation d'urgence (H3). La complaisance pourrait expliquer ce résultat, comme Hoc *et al.* (2009) l'ont suggéré, dans la mesure où les participants avec un niveau de confiance élevé dans la CCA pourraient ne pas avoir envisagé une potentielle défaillance du système. Cet effet négatif de la confiance sur la performance a été atténué dans la condition de pratique élaborée, confirmant partiellement la quatrième et dernière hypothèse (H4).

Lee et Moray (1992) ont caractérisé la confiance comme un déterminant important de la performance d'un système. Muir *et al.* (1996) ont également trouvé qu'il y a une relation

inversée entre la confiance et la surveillance de l'automatisation, ce qui signifie que plus il y a de confiance, moins le système est surveillé. Cette relation pourrait expliquer pourquoi les opérateurs quittent la boucle de contrôle, étant donné que sortir de cette boucle a été associé avec *une confiance humaine excessive dans les dispositifs informatiques* (Kaber *et al.*, 1997). Dans cette deuxième étude, cette relation inversée a été observée dans la condition de pratique simple mais pas dans la condition de pratique élaborée. Dans la condition de pratique simple, les conducteurs avec un niveau de confiance élevé ont eu des temps de réponse plus longs dans la situation d'urgence que ceux ayant des niveaux de confiance plus modérés. De telles différences n'ont pas été observées parmi les participants de la condition pratique élaborée. Comme que les deux groupes expérimentaux ont fait confiance au système de CCA, ils ont été susceptibles de moins superviser le système. Dès lors, à moins que les conducteurs aient suffisamment pratiqué la CCA, plus ils ont confiance dans le système, plus ils pourraient rencontrer de difficultés à reprendre le contrôle de manière subite.

Cette étude confirme les résultats observés par Inagaki *et al.* (2004), et apporte davantage d'informations sur les facteurs expliquant le ralentissement des temps de freinage lorsque l'automatisation est utilisée (Neubauer *et al.*, 2012 ; Saxby *et al.*, 2008) ou les temps de reprise de contrôle manuel (Young *et al.*, 2007) dans une situation d'urgence (défaillance du système). Ces phénomènes ont été attribués à la fatigue passive (Desmond *et al.*, 2001) ou à la baisse de ressources attentionnelles (Young *et al.*, 2007) lorsque les conducteurs n'avaient pas de tâche secondaire à réaliser. Comme suggéré précédemment, la complaisance, caractérisée dans la présente étude par un niveau élevé de confiance, pourrait entraîner des difficultés lors de la reprise de contrôle du véhicule (Hoc *et al.*, 2009). Ainsi, la complaisance pourrait expliquer les temps de réponse plus longs dans le scénario de panne du système pour les conducteurs qui ont eu une confiance élevée dans la CCA. Ce résultat est aussi cohérent avec les travaux de Bainbridge (1983), bien que notre champ d'investigation soit la conduite

automatisée. Cependant, la présente étude réalisée dans un simulateur pourrait avoir atténué l'impression de danger létal lors de l'utilisation de la CCA, et ainsi augmenté leurs niveaux de confiance et d'acceptabilité du système.

L'effet de la surconfiance, qui a augmenté les temps de réponse en situation d'urgence, a été modéré par une pratique élaborée. Concernant la calibration, il serait possible d'atteindre un niveau de confiance optimisé dans la CCA avec la *méta-confiance*, mais cette construction collective, qui se fonde sur les interactions d'usagers à usagers, nécessite que la CCA soit accessible au tout-venant. Communiquer un feedback aux utilisateurs sur la fiabilité de l'automatisation peut contribuer à développer un niveau de confiance approprié dans le système (Hoff & Bashir, 2014). Lors des premières utilisations avec le système de CCA, les individus partageront probablement leur expérience avec d'autres personnes, les mettant au courant des capacités globales du système. Dans notre étude, les participants n'ont pas pu partager leur expérience avec d'autres individus n'ayant pas utilisé le système, ce qui pourrait être testé dans le cadre de nouvelles recherches pour évaluer l'impact du feedback et de la méta-confiance sur la performance de reprise de contrôle manuel. Il n'y a pas eu de différences significatives entre l'acceptabilité *a priori* et *a posteriori* de la CCA. Cependant, concernant la dimension *intérêt à utiliser le système en état physique dégradé*, le score moyen a été significativement inférieur *a posteriori*, ce qui pourrait signifier que les participants ont été moins confiants pour utiliser ce système en état physique dégradé après avoir vécu une panne du système.

Les deux sessions de pratique sont courtes. Toutefois, le but de cette étude est de comparer les sessions de pratique en termes de qualité plutôt que de quantité. En effet, cette session pratique courte pourrait être utilisée par les concessionnaires automobiles pour montrer aux conducteurs comment reprendre le contrôle manuel, ce format correspondant une première situation d'interaction typique, c'est-à-dire une première prise en main. Alors que la

législation de la CCA n'est pas encore à jour, montrer aux individus comment réaliser les manœuvres de base de la CCA (enclencher le système et reprendre le contrôle manuel) pourrait améliorer significativement la sécurité quand les conducteurs utilisent de tels systèmes pour la première fois. Examiner l'impact d'une pratique plus longue et plus complète sur la performance de la reprise de contrôle manuel, notamment en expliquant les principes de fonctionnement du système comme il l'a été suggéré dans le domaine de l'aviation civile (Federal Aviation Administration, 2013a), pourrait améliorer et révéler d'autres dimensions de la performance de reprise de contrôle manuel.

Il semble nécessaire de poser quelques limites à la lecture de ces résultats. Il est possible que des participants n'aient pas immédiatement compris que l'alarme *panne du système* faisait référence au système de CCA, et non pas au simulateur. Fournir aux conducteurs des instructions plus spécifiques (*reprenez le contrôle* au lieu de *panne du système*) pourrait les aider à reprendre le contrôle de manière plus sûre (Inagaki, 1999). Alors que la connaissance de la logique de fonctionnement d'un système de CCA pourrait influencer les attitudes et comportements pendant l'utilisation d'un tel système, de prochaines recherches devraient examiner les effets de l'entraînement (plus développé que la pratique) sur les performances de la CCA en disant aux conducteurs comment la CCA fonctionne, quels sont ses limites et son potentiel. Les prototypes de CCA sont conduits par des experts qui savent exactement comment la technologie qu'ils utilisent fonctionne, alors que les conducteurs non professionnels n'ont pas ces connaissances spécifiques. Enfin, les effets de la réalisation d'une tâche, autre que la supervision de la conduite, avant de reprendre le contrôle manuel du véhicule devraient être investigués dans des situations anticipées et urgentes, dans la mesure où la charge de travail mentale et physique (avoir les mains occupées au moment de la reprise de contrôle, les pieds croisés sous le siège, etc.) pourrait avoir un impact sur la RCM.

2.8. Perspectives

Le but de cette étude était de mettre en évidence les effets de la confiance et de la pratique sur la performance de reprise de contrôle manuel lors de l'utilisation d'une voiture complètement automatisée. Les résultats ont montré qu'un évènement inattendu, en l'occurrence une panne, pouvait entraîner une diminution du temps de réponse des conducteurs quand ces derniers ont un niveau de confiance élevé dans le système. D'une part, un permis spécifique à la conduite de véhicules complètement automatisés pourrait être une solution pour entraîner, et non plus seulement faire pratiquer, les utilisateurs à la reprise de contrôle dans les situations les plus critiques. D'autre part, les concepteurs devraient prendre en compte que l'expérience avec le système améliore la performance de la reprise de contrôle manuel en terme de temps de réponse ; ainsi, incorporer un tutoriel avec un feedback spécifique sur comment faire face à des situations critiques pourrait améliorer la qualité de l'interaction homme-machine.

Les effets d'une courte pratique de la conduite complètement automatisée sur la performance de reprise de contrôle vont être davantage explorés dans la prochaine étude. Bien que toujours courte, cette pratique sera plus intensive, et les conducteurs seront informés des caractéristiques du système, de sa logique de fonctionnement, de son potentiel et ses limites, et verront une vidéo de démonstration d'utilisation de la CCA. La confiance ne sera plus mesurée uniquement en fonction de ce que les participants déclarent mais également en fonction de leur comportement observé. Les effets de la réalisation d'une autre tâche que conduire sur la reprise de contrôle manuel seront également examinés, car le fait d'être conduit par le système permettra ce genre d'activités. Un apprentissage élaboré devrait permettre de faciliter la reprise de contrôle manuel de la conduite dans ce nouveau type de situations.

3. Etude 3 : Impact de l'entraînement et de la réalisation d'une tâche sur la reprise de contrôle manuel dans une voiture complètement automatisée sur simulateur

Cette étude a été valorisée par un article (Payre, Cestac, Dang, Vienne, & Delhomme, submitted) ainsi qu'une communication (Payre, Cestac, & Delhomme, 2015, October).

3.1. Introduction

La troisième étude a été réalisée dans le simulateur de conduite de l'IFSTTAR. La vitesse a été baissée de 20 km/h par rapport à l'étude précédente pour se rapprocher du cadre d'une expérimentation sur route à 110 km/h (A86) qui était envisagée. Elle vise à expliciter la manière dont les conducteurs pourraient apprendre à utiliser cette nouvelle technologie, laquelle utilisation peut présenter des risques. L'objectif est de rendre cette utilisation sûre pour les utilisateurs et pour les autres usagers de la route (piétons, motocyclistes, automobilistes, cyclistes etc.). Par conséquent, la notion d'apprentissage de la conduite automatisée est explorée dans cette recherche. L'évolution technologique peut entraîner une modification de l'apprentissage. La conduite complètement automatisée introduit des compétences nouvelles, et des questions se posent quant à la capacité des automobilistes à assurer avec sécurité une reprise de contrôle manuel. La variable pratique de la conduite complètement automatisée évolue en entraînement (deux modalités : simple vs. élaboré), constitué de la pratique donc, mais également d'une partie théorique et d'une vidéo de démonstration. La CCA permettra aux conducteurs de s'engager dans divers activités pendant que le pilotage automatique est actif. De ce fait, une seconde variable indépendante a été mise en place afin d'examiner son impact sur la sécurité et la performance de la reprise de

contrôle : la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite vs. l'absence de réalisation. L'un des objectifs de la présente étude est d'examiner les gestes et postures des conducteurs et leurs conséquences sur la reprise de contrôle manuel (RCM) urgente. Impliquer les conducteurs visuellement, physiquement et cognitivement dans des tâches exigeantes présente des enjeux majeurs lorsque la RCM est nécessaire. On peut présumer qu'être engagé dans une tâche non reliée à la conduite pourrait avoir des conséquences négatives sur la RCM.

Les mêmes mesures d'attitudes que dans la deuxième étude sont effectuées. La confiance est cette fois-ci observée *in situ* via un dispositif de caméras placées dans l'habitacle de la voiture. En effet, nous avons considéré que le nombre de relevés de têtes réalisés par les participants pour regarder la route, alors qu'ils sont en train de réaliser une tâche non reliée à la conduite, est un indicateur de confiance. La confiance est également mesurée par un questionnaire. La performance de la reprise de contrôle manuel est mesurée avec deux indicateurs : le temps de réponse (indicateur quantitatif) et la précision de l'utilisation des pédales (indicateur qualitatif). La manière de reprendre le contrôle manuel est également analysée. Un oculomètre et un dispositif de mesure de la réaction électrodermale ont été utilisés afin de recueillir des données physiologiques, notamment pour évaluer l'anxiété et la vigilance. Enfin, une tâche de listage d'idées a été mise en place pour savoir à quoi pensaient les participants lorsque le pilotage automatique était actif.

Pour développer une méthode d'entraînement à la CCA, nous nous sommes appuyés sur la matrice Goals for Driver Education (GDE ; Hatakka *et al.*, 2002). Cette matrice est un modèle analytique qui hiérarchise en quatre niveaux les comportements des automobilistes. Cette étude s'appuie sur les deux premiers niveaux du modèle, à savoir le maniement d'un véhicule complètement automatisé (enclencher le système et reprendre le contrôle manuel du véhicule) et la maîtrise de différentes situations de circulation (cf. Chapitre III.4.)

3.2. Questions de recherche

L'objectif de l'étude était d'analyser les comportements et attitudes des conducteurs dans un véhicule complètement automatisé en fonction du type d'entraînement suivi. Le trajet réalisé a comporté des tronçons en mode de pilotage automatique, pendant lesquels deux pannes du système surviendront de manière inopinée, alors que les conducteurs réaliseront ou non une tâche non reliée à la conduite. En outre, quel serait l'impact de l'entraînement sur la confiance, notamment vis-à-vis de la calibration ? Comment les conducteurs non-professionnels et non experts dans le domaine de la CCA reprendraient-ils le contrôle du véhicule dans des situations d'urgence (mouvements des bras et pieds, temps de réponse et précision dans l'utilisation des commandes) ? Ces comportements varieront-ils selon le genre, l'expérience de conduite et en fonction des conditions de circulation ?

Comprendre comment les automobilistes gèrent les défaillances d'un système automatisé mérite d'être investigué, ainsi que les comportements dans ces situations en fonction de l'expérience de l'opérateur. En effet, comparée à un système partiellement automatisé, la conduite hautement automatisée sur simulateur entraîne un plus grand nombre de collisions, une diminution de la conscience de la situation et de l'inter-distance entre les véhicules, en cas de défaillances (Strand, Nilsson, Karlsson, & Nilsson, 2014). La surconfiance peut augmenter les temps de réponse des conducteurs pour reprendre le contrôle manuel d'une voiture complètement automatisée dans une situation d'urgence sur simulateur (Payre, Cestac, & Delhomme, in press). Enfin, bien que la CCA soit plus acceptée *a priori* par les hommes et qu'ils manifestent davantage d'attitudes positives à son égard que les femmes (Payre *et al.*, 2014), il y a peu de données sur le lien potentiel entre la confiance dans la CCA et le genre, ce qui mériterait d'être examiné.

3.3. Hypothèses

Hypothèses générales :

- Un entraînement pratique et théorique de la conduite complètement automatisée permettra d'améliorer les performances de conduite des conducteurs non-professionnels.
- La réalisation d'une tâche non reliée à la conduite pendant que le pilotage automatique est actif entravera la reprise de contrôle manuel dans des situations d'urgence.

3.4. Méthode

3.4.1. Matériel

Le même simulateur de conduite automobile de l'IFSTTAR de l'étude 2 a été utilisé pour cette troisième étude. De plus, deux caméras ont été positionnées dans le véhicule. La première a permis de voir le tableau de bord, la partie supérieure du visage des participants, dans le rétroviseur, et la position de leurs mains (Figure 14). La seconde a permis de voir les pieds et leurs actions sur les pédales.

Figure 14 : Vue de l'habitacle du véhicule du simulateur, pendant la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite



3.4.2. Participants

Un échantillon de 113 automobilistes, dont 55 hommes, ont participé à l'étude (Tableau 18). Ils ont reçu une compensation financière de 50 € pour leur participation. Tous les automobilistes doivent posséder le permis B valide pour pouvoir prendre part à l'étude. Ils ont tous répondu à un questionnaire après avoir utilisé le simulateur. L'âge moyen de l'échantillon est de 40.3 ($SD = 13.2$, Min = 19, Max = 70). Ils possèdent leur permis de conduire depuis 20.5 ans en moyenne ($SD = 13.2$, Min = 1, Max = 49) quand ils ont répondu au questionnaire en juin et juillet 2014. Ils ont déclaré avoir conduit en moyenne 301km la semaine précédant les réponses ($SD = 321$, Min = 0, Max = 2000). Les passations sont individuelles et les participants sont répartis en quatre groupes de manière équivalente selon leur âge et leur genre. Ils sont restés anonymes tout au long de l'étude.

Tableau 18 : Répartition de l'effectif ($N = 113$)

Condition expérimentale	Avec tâche non reliée à la conduite		Sans tâche	Total
1. Entraînement simple	30	29		59
2. Entraînement élaboré	28	26		54
3. Total	58	55		113

3.4.3. Procédure

3.4.3.1. Partie entraînement

Les participants sont tous informés qu'ils sont libres d'arrêter l'étude à tout moment, bien que personne ne l'ait fait. En ce qui concerne ceux ayant suivi l'entraînement élaboré, il leur est dit qu'ils vont participer à une étude sur la conduite complètement automatisée, et qu'ils auront à accomplir trois tâches : lire un texte décrivant la CCA et répondre à des questions par la suite, puis conduire durant trois sessions dans le simulateur pour enfin répondre à un questionnaire informatisé.

Concernant le texte expliquant ce qu'est la CCA, l'objectif est d'informer les participants sur la manière dont elle fonctionne (en utilisant le marquage au sol), et quelles sont les limites ainsi que le potentiel de cette technologie. Il leur est dit qu'ils auront à répondre à des questions sur ce texte et que l'expérimentateur corrigera l'exercice avec eux. Ensuite, il leur est présenté pendant 1:42 min une vidéo expliquant comment enclencher et reprendre le contrôle de la conduite. La première et la troisième perspective (egocentrée et allocentrée) sont utilisées car la visualisation des gestes d'une action contribue à sa meilleure compréhension (Tversky, 2011). A la fin de la vidéo, il est précisé qu'une longue exposition à la CCA peut favoriser la somnolence.

Les autres participants suivant l'entraînement simple sont directement invités à se familiariser avec le simulateur. La partie suivante de l'étude se déroule dans le simulateur de

CCA et est commune aux deux groupes expérimentaux. Tous les participants ont réalisé une phase de familiarisation durant 5 min, pendant laquelle ils ont pu tester les fonctionnalités du système de conduite. La voiture instrumentée du simulateur permet d'utiliser une boîte automatique ou manuelle. Dans le cadre de cette étude, la transmission automatique a été choisie. Les consignes suivantes leur ont été données : *La boîte de vitesse est automatique. Il n'y a pas besoin d'actionner la pédale d'embrayage qui est bloquée, ni de manipuler le levier de vitesse. L'objectif est de démarrer le véhicule, d'atteindre les 110 km/h et de rester sur la file de droite.* Ensuite, les participants ont entamé la phase d'apprentissage de la CCA selon un entraînement simple ou élaboré. Les consignes suivantes ont été données à tous les participants : *Le véhicule que vous allez conduire est un véhicule automatisé. Le pilotage automatique ne peut être activé que dans des zones dédiées qui seront indiquées. Lorsque le pilotage automatique est activé, vous n'avez besoin de toucher ni le volant, ni les pédales pour que le véhicule avance. Le pilotage automatique gère les dépassements, l'accélération, le freinage, et les interactions avec les autres véhicules. Pour l'enclencher, vous devez faire un seul appel de phares. Pour reprendre le contrôle manuel de la voiture, il vous suffit de tourner le volant de manière sèche, d'appuyer sur une des pédales (frein, accélération) ou d'activer le levier d'activation (appel de phares). Pour des raisons d'enregistrement, le plafonnier doit être allumé dans l'habitacle. L'objectif est de partir d'une voie d'insertion sur l'autoroute et d'atteindre les 110 km/h. Il faut que vous restiez à cette allure, sauf indication contraire. Vous devez également rester sur la file de droite. Des consignes sonores et écrites sur la tablette vous indiqueront les moments où vous devrez activer ou désactiver la conduite automatisée. Est-ce que vous avez compris ce qu'est le pilotage automatique ?*

Les deux sessions d'entraînement à la CCA sur simulateur ont duré environ 5 min. Tous les messages provenant du système de pilotage automatique ont été diffusés simultanément de manière sonore et visuelle, notamment parce qu'un signal acoustique

permettait de réduire le temps de réaction pour freiner, que les automobilistes soient distraits ou non (Lee, McGehee, Brown, & Reyes, 2002). Le groupe de la condition d'entraînement simple a consisté à démarrer manuellement la voiture, accélérer jusqu'à 110 km/h, activer le pilotage automatique, le désactiver après une minute (reprise de contrôle anticipée), et enfin reprendre le contrôle manuel du véhicule afin de l'arrêter. Le groupe de la condition d'entraînement élaboré a davantage exploré le système de CCA : après l'avoir enclenché, un véhicule a dépassé celui du participant, puis a effectué à son tour un dépassement. Par la suite, le marquage au sol a été couvert de feuilles et le système indique visuellement sur la tablette et auditivement *Fiabilité du système faible*. Par conséquent, le véhicule a commencé à faire des embardées légères mais fréquentes entre les deux voies pendant 20 s, dont l'amplitude allait du milieu de la voie de droite au milieu de la voie de gauche. Les automobilistes étaient libres de laisser le système gérer la situation ou de reprendre le contrôle manuel du véhicule. Si tel était le cas, le système leur demandait d'enclencher à nouveau le pilotage automatique après quelques secondes. Cette reprise de contrôle manuel ressemblait à une manœuvre d'urgence, mais aucun message de danger n'a été diffusé. Les participants ont été prévenus 3 s avant de reprendre le contrôle, ce qui n'a pas pu être considéré comme une reprise de contrôle anticipée.

Les deux groupes d'apprentissage ont ensuite été subdivisés en fonction de la nécessité ou non de réaliser une tâche non reliée à la conduite lorsque le pilotage automatique est enclenché. Les consignes pour le groupe ayant deux tâches non reliées à la conduite sont les suivantes : *Durant le trajet vous serez amené(e) à réaliser deux tâches sur papier à deux moments distincts. La première tâche est une liste d'anagrammes, il faudra en résoudre le plus possible. Une anagramme est un mot dont les lettres ont été mélangées, il faut remettre les lettres dans le bon ordre pour trouver le mot d'origine. Par exemple, vous voyez APPA, et si vous réorganisez ces lettres vous obtiendrez le mot PAPA. La deuxième tâche est un*

labyrinthe. Il faut partir de l'extérieur pour arriver au centre. Un message sonore vous indiquera quand commencer ces tâches. Votre but est d'avancer le plus possible dans ces tâches, même si vous n'arrivez pas à les finir. Reposez définitivement la planche et le stylo une fois que vous avez arrêté la tâche. Ces deux tâches ont été choisies car elles sont exigeantes cognitivement. Toutefois, le début de chacune des tâches est facile afin d'inciter les participants à la poursuivre. Elles ont été présentées toutes les deux sur un support papier afin que les participants aient le regard fixé sur leurs genoux et non pas en direction de la route ou du tableau de bord (voir Figure 14).

Ensuite, des questions ont été posées aux participants pour vérifier qu'ils avaient bien compris comment fonctionnait la CCA, et s'ils estimaient avoir reçu suffisamment d'informations pour l'utiliser. Leurs réponses ont été recueillies sur papier (échelle de Likert allant de 1 *pas du tout d'accord* ; à 7 *tout à fait d'accord*) : *Je vais maintenant vous poser trois questions après cette première utilisation du pilotage automatique. Votre réponse sera un chiffre compris entre 1 et 7, sachant que 1 correspond à « pas du tout » et 7 correspond à « tout à fait » :*

- *J'estime pouvoir contrôler le système de pilotage automatique*
- *J'estime avoir reçu suffisamment d'information concernant le fonctionnement du pilotage automatique*
- *J'estime savoir utiliser le système de pilotage automatique*

Enfin, les participants ont été prévenus que des dispositifs d'enregistrement avaient été mis en place dans le véhicule et sur eux : *Je vais vous installer ces capteurs qui mesurent votre niveau de stress. Il ne faudra pas les toucher ni interagir avec la tablette. Vous êtes également filmé(e), et les données restent confidentielles.*

3.4.3.2. Partie scénario commun

Concernant le trajet commun réalisé par les deux groupes, il durait 23 min approximativement (Tableau 19) et il leur était demandé d'enclencher le pilotage automatique après avoir accéléré jusqu'à 110 km/h, avec la possibilité de reprendre le contrôle manuel dès qu'ils le souhaitent.

Tableau 19 : Description des deux différents entraînements et du trajet commun réalisé sur simulateur

	<i>Entraînement simple</i>	<i>Entraînement élaboré</i>	<i>Durée</i>
<i>Entraînement</i>	conduite manuelle activation de la CCA reprise de contrôle manuel	conduite manuelle activation de la CCA être dépassé par une voiture dépasser une voiture fiabilité du système faible activation de la CCA reprise de contrôle rapide activation de la CCA reprise de contrôle manuel	3 min
<i>Trajet commun</i>	conduite manuelle (étape 1) activation de la CCA ralentir jusqu'à 50 km/h (étape 2) embouteillages négozier des virages accélérer jusqu'à 110km/h en quittant les embouteillages être dépassé par une voiture (étape 3) dépasser une voiture (étape 4) freiner (étape 5) accélérer fiabilité du système faible (étape 6) (reprise de contrôle manuel) activation de la CCA situation dangereuse (étape 7) rien à signaler (étape 8) 1^{ère} panne du système (étape 9) reprise de contrôle manuel urgente (étape 10) activation de la CCA 2^{ème} baisse de fiabilité (étape 11) (reprise de contrôle manuel) ralentir jusqu'à 40 km/h (étape 12) embouteillages 2^{ème} panne du système (étape 13) reprise de contrôle manuel urgente (activation de la CCA) (étape 15)		23 min

Tableau 18 : Le texte en gras indique le mode de pilotage automatique, alors que le texte non gras indique le mode de conduite manuelle. Les événements entre parenthèses correspondent à des situations qui dépendent de la volonté de l'automobiliste.

Détail du contenu des deux entraînements à la CCA sur simulateur :

Groupe ayant suivi l'entraînement simple (durée : 3min) :

1. Le participant démarre le véhicule en mode manuel pour atteindre 110 km/h. Le message *Veillez rouler à 110 km/h* est diffusé par la voix et sur la tablette. Après une dizaine de secondes à rouler à 110 km/h, la voix et le message sur la tablette se déclenche : *Zone de pilotage automatique autorisée* suivi de *Veillez activer le pilotage automatique*. Au même moment, un panneau sur la droite de l'autoroute indique *Zone de pilotage automatique autorisée*. L'entrée en pilotage automatique se fait en exerçant une pression sur le levier correspondant. Le message *Pilotage automatique activé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette.
2. Après une quinzaine de secondes en pilotage automatique en ligne droite, le véhicule se range sur la file de droite s'il n'y est pas déjà. Il y a un virage sur l'autoroute, le véhicule automatisé le négocie.
3. Une dizaine de secondes après la fin du virage, déclenchement de la voix et du message sur la tablette : *Fin de zone de pilotage automatique* suivi de *Veillez reprendre le contrôle du véhicule*. Un panneau sur le bord de la route indique *Fin de zone de pilotage automatique*. Le conducteur reprend le contrôle manuel du véhicule roulant à 110km/h en manipulant soit le volant soit les pédales. Un panneau *Terminé* apparaît ensuite au bord de la route. On demande au participant de ralentir et d'arrêter le véhicule.

Groupe ayant suivi l'entraînement élaboré (durée : 3min) :

Les deux premières étapes de cette condition sont identiques à l'entraînement simple.

3. Une voiture plus lente (90km/h) apparaît sur la file de droite. Lorsque le VA (véhicule automatisé) est à 72 mètres du véhicule à dépasser, la voix annonce *Dépassement imminent*. Le même message s'affiche sur la tablette. Le VA dépasse la voiture en s'insérant dans la file de gauche, puis se rabat lorsqu'elle l'a dépassée de 18 mètres.
4. Quelques secondes après le dernier dépassement, le marquage au sol est couvert par des feuilles. A ce moment, la tablette et la voix indiquent *Fiabilité du système faible*. Lorsque les lignes de marquages au sol redeviennent visibles, le message *Fiabilité du système maximum* est énoncé à l'oral et sur la tablette. Si le participant a repris le contrôle, diffusion du message *Veillez rouler à 110 km/h* par la voix et sur la tablette, suivi de *Veillez activer le pilotage automatique*.
5. Après 30 secondes en mode automatique, une voix annonce *Le système va être désactivé, veuillez reprendre le contrôle*. Le même message apparaît sur la tablette. Au bout d'environ 5 secondes, une alarme sonne 3 fois lorsque le pilotage automatique se désactive. Le participant reprend le contrôle du véhicule.
6. Après une dizaine de secondes à rouler en mode manuel, la voix et le message sur la tablette se déclenchent : *Veillez activer le pilotage automatique*. L'entrée en pilotage automatique se fait en exerçant une pression sur le levier correspondant. Le message *Pilotage automatique activé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette.
7. Une quinzaine de secondes après que le pilotage automatique a été activé, la voix et le message sur la tablette se déclenche : *Fin de zone de pilotage automatique*, suivi de *Veillez reprendre le contrôle du véhicule*. Un panneau sur le bord de la route

indique *Fin de zone de pilotage automatique*. Le conducteur reprend le contrôle manuel du véhicule roulant à 110km/h en actionnant soit le volant soit les pédales. Le message *Pilotage automatique désactivé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette. Le conducteur roule encore quelques secondes et s'arrête à la vue du panneau *Terminé*.

Détail des étapes du trajet commun réalisé par tous les participants :

Etape 1 : conduite manuelle pour enclencher le pilotage automatique (durée : 1 min 30)

Le participant démarre le véhicule en mode manuel pour atteindre 110 km/h. Le message *Veillez rouler à 110 km/h* est diffusé par la voix et sur la tablette. Après une dizaine de secondes à rouler à 110km/h, la voix et le message sur la tablette se déclenchent : *Zone de pilotage automatique autorisée* suivi de *Veillez activer le pilotage automatique*. Au même moment, un panneau sur la droite de l'autoroute indique *Zone de pilotage automatique autorisée*. L'entrée en pilotage automatique se fait en exerçant une pression sur le levier correspondant. Le message *Pilotage automatique activé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette

Etape 2 : entrée en pilotage automatique dans les embouteillages (durée : 3 min)

Après quelques secondes en pilotage automatique, le message *Bouchons en approche* est diffusé par la voix et sur la tablette. Le véhicule décélère jusqu'à 50 km/h pour se retrouver en queue d'embouteillages qui occupent les deux files devant lui. S'il n'est pas sur la file de droite, le VA se rabat automatiquement. Il suit la vitesse des embouteillages selon un phénomène d'accordéon. Au bout de quelques minutes, les véhicules accélèrent pour sortir du champ de vision du participant. Le VA accélère jusqu'à 110 km/h.

Etape 3 : se faire dépasser à haute vitesse en pilotage automatique (durée : 1 min)

Après une quinzaine de secondes en pilotage automatique en ligne droite, le véhicule se range sur la file de droite s'il n'y est pas. Un véhicule dépasse la voiture automatisée sur la file de gauche puis se rabat sur la file de droite.

Etape 4 : premier dépassement en mode de CCA à haute vitesse (durée : 1 min)

Une voiture plus lente (90 km/h) apparaît sur la file de droite. Lorsque le VA (véhicule automatisé) est à 72 mètres du véhicule à dépasser, la voix annonce *Dépassement imminent*. Le même message s'affiche sur la tablette. Le VA dépasse la voiture en s'insérant dans la file de gauche, puis se rabat lorsqu'elle l'a dépassée de 18 mètres.

Etape 5 : freinage fort et dépassement en pilotage automatique à haute vitesse (durée : 1 min)

Une dizaine de secondes après la fin de l'étape 4, une voiture sur la file de droite est dans le champ de vision. L'inter-distance se réduit rapidement car elle freine fort et brusquement. Le VA freine également et la voix annonce *Dépassement imminent*. Le même message s'affiche sur la tablette. Le VA dépasse la voiture en s'insérant dans la file de gauche, puis se rabat lorsqu'elle l'a dépassée de 18 mètres.

Etape 6 : fiabilité du système faible (durée : 1 min)

Quelques secondes après le dernier dépassement, le marquage au sol est couvert par des feuilles. A ce moment, la tablette et la voix indiquent *Fiabilité du système faible*. Lorsque les lignes de marquages au sol redeviennent visibles, le message *Fiabilité du système maximum* est énoncé à l'oral et sur la tablette. Si le participant a repris le contrôle, diffusion du message *Veillez rouler à 110 km/h* par la voix et sur la tablette, suivi de *Veillez activer le pilotage automatique*.

Etape 7 : perception d'une situation de danger en pilotage automatique (durée : 1 min 30)

Quelques secondes après la fin de l'étape 6, une voiture sur la file de droite est en vue. Une fois arrivé à une dizaine de mètres du véhicule, une voix annonce *dépassement imminent*. Le même message s'affiche sur la tablette. Le VA dépasse la voiture en s'insérant dans la file de gauche. Il y a trois véhicules sur la file de droite. Le deuxième véhicule de la file de droite déboite quand le dépassement est en cours.

Il y a deux situations possibles :

- Le VA ralentit et freine à temps, termine le dépassement en suivant la voiture qui a déboité.

Il se remet enfin sur la file de droite.

- Le conducteur reprend le contrôle manuel du véhicule et termine lui-même la manœuvre.

Etape 8 : rien à signaler en mode de CCA (durée : 10 min)

Le VA reste sur la file de droite et se fait dépasser toutes les minutes pendant 10 min.

Au bout de 30 s, il est demandé aux participants devant réaliser la tâche d'anagrammes (moitié des participants) de la commencer : *Veillez commencer la tâche d'anagrammes*, par un message diffusé uniquement oralement. Les autres participants n'ont pas de consigne.

Etape 9 : panne du système à haute vitesse (durée : 1 min)

La panne survient en ligne droite pour tous les participants, et au même point kilométrique. La moitié d'entre eux sont donc en train de réaliser la tâche d'anagrammes. Emission d'une alarme d'urgence. Message sonore diffusé : *Panne du système* en même temps que trois bips sonore. Le message *Panne du système* apparaît également sur la tablette, avec un triangle rouge comprenant un point d'exclamation en son centre. L'automobiliste doit reprendre le contrôle manuel du véhicule.

Etape 10 : reprise de la CCA à haute vitesse (durée : 1 min)

Une vingtaine de secondes après la fin de l'étape 10, déclenchement de la voix et du message sur la tablette : *Veillez rouler à 110km/h*, suivi de *Veillez activer le pilotage automatique*. L'entrée en pilotage automatique se fait en exerçant une pression sur le levier correspondant. Le message *Pilotage automatique activé* est énoncé par la voix et affiché sur la tablette.

Etape 11 : baisse de fiabilité du système de CCA (durée : 1 min)

Quelques secondes après le dernier dépassement, le marquage au sol est couvert par des feuilles. A ce moment, la tablette et la voix indiquent *Fiabilité du système faible*. Lorsque les lignes de marquages au sol redeviennent visibles, le message *Fiabilité du système maximum* est diffusé à l'oral et sur la tablette. Si le participant a repris le contrôle, diffusion du message *Veillez rouler à 110 km/h* par la voix et sur la tablette, suivi de *Veillez activer le pilotage automatique*.

Etape 12 : deuxième entrée en pilotage automatique dans les embouteillages (durée : 1 min)

Après quelques secondes en pilotage automatique, le message *Bouchons en approche* est diffusé par la voix et sur la tablette. Le VA décélère jusqu'à 50 km/h pour se retrouver en queue d'embouteillages qui occupent les deux files devant lui. S'il n'est pas sur la file de droite, le VA se rabat automatiquement. Il suit la vitesse des embouteillages selon un phénomène d'accordéon. Au bout de quelques minutes, les véhicules accélèrent pour sortir du champ de vision du participant. Le VA accélère jusqu'à 110 km/h.

Au bout de 30 s, il est demandé aux participants devant réaliser la tâche de labyrinthe de la commencer : *Veillez commencer la tâche de labyrinthe*, diffusé uniquement oralement. Les participants ne devant pas réaliser cette tâche n'ont pas de consignes.

Etape 13 : panne du système à basse vitesse (durée : 1 min)

Après 1 min passée dans les embouteillages, une alarme d'urgence retentit. Un message sonore est diffusé : *Panne du système* en même temps que trois bips sonores. Le même message apparaît également sur la tablette, avec un triangle rouge comprenant un point d'exclamation en son centre. L'automobiliste doit reprendre le contrôle manuel du véhicule.

Etape 15 : Fin du trajet en pilotage manuel (durée : 1 min)

Une minute après la fin de l'étape 14, un panneau *Terminé* apparaît sur le côté de la route. Le participant, toujours en queue de bouchons, arrête le véhicule, qu'il soit resté en mode manuel ou en mode de pilotage automatique.

3.5. Mesures

3.5.1. Questionnaire

Tous les participants ont répondu à un questionnaire après avoir utilisé le simulateur. Ce dernier comprend des questions sur la confiance (8 items, $\alpha = .88$), la responsabilité (5 items, $\alpha = .71$), l'intention d'utilisation (1 item) et d'achat (1 item), et l'acceptabilité (7 items, $\alpha = .73$) à l'égard de la CCA (Payre *et al.*, 2014). Les items sont présentés sous la forme d'échelle de Likert en 7 points, allant de 1 *pas du tout d'accord* à 7 *tout à fait d'accord*. La dernière partie du questionnaire comprend des questions sociodémographiques présentées dans les annexes (1.1.).

3.5.2. Mesures physiologiques

La première mesure physiologique est la réaction électrodermale. L'instrument, eSense de Mindfield, comporte deux électrodes à placer sur la pulpe de deux doigts adjacents, généralement l'index et le majeur de la main. La réaction électrodermale est un indicateur d'éveil physiologique (anxiété). La fréquence d'enregistrement est de 10Hz, équivalent à dix données enregistrées par seconde (voir Annexe 3.3).

La deuxième mesure physiologique est oculométrique. Un oculomètre SMI sur une casquette est utilisé afin de mesurer le diamètre pupillaire et le *PERCLOS* (pourcentage de temps avec les yeux fermés). Le diamètre pupillaire est un indicateur d'anxiété, le *PERCLOS* un indicateur de vigilance. La fréquence d'enregistrement est de 60Hz.

3.5.3. *Comportements dans le véhicule*

Quatre indicateurs comportementaux ont été utilisés. Le premier est le temps de réponse lors d'une reprise de contrôle urgente. Ce temps de réponse sera mesuré en fonction de la réalisation ou non d'une autre tâche que la conduite lors de cet événement. Il a été calculé à partir du moment où le signal d'alarme est enclenché jusqu'à ce que le participant appuie sur les pédales ou tourne le volant du véhicule.

Le deuxième indicateur évalue une composante de la qualité de la reprise de contrôle en cas d'urgence, à savoir la précision de l'utilisation des pédales, cf. Figure 15. Il a été mesuré en comptabilisant le nombre d'interactions avec les pédales du véhicule sur une période de 30 s après la panne du pilotage automatique. Ce comptage a été réalisé après l'étude à partir des vidéos. Cette mesure (nommée *nombre d'interactions pieds-pédales*) comporte quatre modalités : *appui sur l'accélérateur, appui sur le frein, pied au-dessus de l'accélérateur, pied au-dessus du frein*. Les individus les plus précis lors de la reprise de contrôle sont ceux qui feront le moins d'erreurs et auront le moins d'hésitations dans l'utilisation des pédales. Ils auront donc moins d'interactions avec les pédales et réaliseront une reprise de contrôle de meilleure qualité. La précision de la reprise de contrôle fait référence à l'utilisation adéquate des commandes du pilote d'après la Federal Aviation Administration.

Figure 15 : Prise de vue dans l'habitacle du véhicule pour mesurer la précision de l'utilisation des pédales



Le troisième relevé de comportements est la manière spontanée dont les automobilistes reprennent le contrôle manuel en cas d'urgence. Les mouvements des mains et des pieds, et plus précisément leur ordre respectif d'utilisation, sont enregistrés. Cette variable indépendante invoquée a deux modalités : simultanée (pieds et mains en même temps) ou non simultanée (écart entre l'utilisation mains/pieds supérieur à 1 s). Parmi les participants qui n'ont pas repris le contrôle manuel de manière simultanée, nous avons distingués ceux qui ont d'abord utilisé leurs mains ou leurs pieds.

Le quatrième relevé de comportements dans un véhicule complètement automatisé concerne la confiance dans ce type de système, et comprend deux indicateurs. Le premier renvoie au nombre de fois où les participants réalisant la tâche non reliée à la conduite ont relevé la tête pendant la période de 10 min précédant la première reprise de contrôle d'urgence, et pendant les 30 s précédant la deuxième reprise de contrôle urgente. Etant donné que plus la fréquence des regards portés augmente, plus l'attention portée au contrôle du véhicule est importante (Senders, Kristofferson, Levison, Dietrich, & Ward, 1967), cette

mesure est considérée comme un indicateur de confiance dans le système. Qui plus est, il n'est jamais demandé aux participants de surveiller la route. Le deuxième indicateur correspond à la reprise de contrôle manuel ou non du véhicule lorsque le système indique que sa fiabilité est faible.

3.6. Hypothèses opérationnelles

- H1 : L'entraînement élaboré diminuera le temps de réponse lors d'une reprise de contrôle manuel en cas d'urgence, comparé à l'entraînement simple (FAA, 2013a).
- H2 : L'entraînement élaboré améliorera la précision de l'utilisation des pédales de la reprise de contrôle en cas d'urgence, comparé à l'entraînement simple (FAA, 2013a).
- H3 : a. La manière de reprendre le contrôle manuel et le temps de réponse seront reliés, b. Reprendre le contrôle simultanément avec les mains et les pieds dans une situation d'urgence aura une influence sur le temps de réponse c. Ainsi que sur la précision de l'utilisation des pédales. Une interaction avec l'entraînement est attendue.
- H4 : Réaliser une tâche non reliée à la conduite lorsqu'il faudra reprendre le contrôle manuel du véhicule en cas d'urgence : a. Augmentera le temps de réponse b. Entravera la manière de reprendre le contrôle et c. Diminuera la précision de l'utilisation des pédales.
- H5 : a. L'entraînement élaboré diminuera le nombre de regards portés sur la route (indicateur de confiance) quand les conducteurs réaliseront une tâche non reliée à la conduite alors que le pilotage automatique est actif (Dzindolet *et al.*, 2003). b. La confiance dans le système de conduite complètement automatisée sera plus adaptée pour les conducteurs ayant suivi un entraînement élaboré (Lee *et al.*, 1992). c. Davantage de conducteurs reprendront le contrôle manuel du véhicule plutôt que de ne pas intervenir lorsque le système indiquera une baisse de fiabilité.

- H6 : Reprendre le contrôle en cas d'urgence sera plus difficile à réaliser lorsqu'il y aura des voitures devant le véhicule du participant que lorsque la voie sera libre (Dingus *et al.*, 1998).
- H7 : Concernant les caractéristiques des conducteurs : a. Les hommes feront plus confiance à la CCA que les femmes (Payre *et al.*, 2014) ; b. Les temps de réponse seront moins rapides avec l'âge (Deary & Der, 2005) ; c. L'expérience de conduite (manuelle et avec des aides à la conduite) diminuera les temps de réponse et améliorera la précision de l'utilisation des pédales.

3.7. Résultats

Des ANOVA univariées, à mesures répétées, des tests de Student et de Chi-deux ont été réalisés pour analyser les données. Les caractéristiques des conducteurs ont été analysées en premier, puis les temps de réponses moyens pour les deux pannes ainsi que l'impact de l'entraînement sur les temps de réponses. Ensuite, la précision de l'utilisation des pédales lors des deux pannes a été analysée, en fonction de l'entraînement. Enfin, la manière de reprendre le contrôle manuel lors des deux pannes et son impact sur le temps de réponse et la précision d'utilisation des pédales ont été examinés. Un participant a repris le contrôle manuel avant la première panne du système, et onze fichiers de données de participants ont subi une perte de données (données vidéo et du simulateur). Cependant, tous les participants ont pu réaliser le scénario en entier, ce qui a permis d'inclure toutes les données recueillies dans les analyses. Avant les pannes du système, tous les participants avaient leurs pieds dans une position de repos, c'est-à-dire qu'ils n'étaient pas sur les pédales du véhicule.

Concernant les questions qui ont été posées aux participants pour vérifier qu'ils avaient bien compris comment fonctionnait la CCA, et s'ils estimaient avoir reçu suffisamment d'informations pour l'utiliser, les scores moyens observés permettent de dire

qu'il n'y a globalement pas eu de problèmes de compréhension ($M = 6.03$, $SD = .93$, $\text{Min} = 2.7$, $\text{Max} = 7$), ni de différence significative entre les deux groupes d'entraînement, $F(1,112) = 0.5$, $p = .82$.

3.7.1. Temps de réponse pour les pannes 1 & 2, et effet de l'entraînement

Une ANOVA à mesures répétées a révélé que le temps de réponse pour l'ensemble des participants lors de la panne 1 est significativement plus long que lors de la panne 2, $F(1,109) = 91.28$, $p < .001$. Les temps de réponse pour la panne 1 sont plus courts lorsque les participants ont suivi l'entraînement élaboré, que lorsqu'ils ont suivi l'entraînement simple, $F(1,109) = 7.93$, $p < .01$, $\eta^2 = .07$. Le même effet positif de l'entraînement élaboré est observé sur les temps de réponse de la panne 2, $F(1,112) = 4.1$, $p < .05$, $\eta^2 = .04$, bien que la taille de l'effet soit plus petite (Tableau 20).

Tableau 20 : Temps de réponse (en s) pour les reprises de contrôle manuel en cas de panne du système, en fonction de l'entraînement ($N = 109$)

Mesure	<i>N</i>	Entraînement simple		Entraînement élaboré	
		<i>M</i> (<i>SD</i>)	Min-Max	<i>M</i> (<i>SD</i>)	Min-Max
1 ^{ère} panne	109	5.01 (1.98)	1.8-10.9	4.1 (1.28)	1.8-7.2
2 nd panne	112	3.22 (1.11)	1.8-10.8	2.85 (0.78)	1.4-5.1

3.7.2. Impact de l'entraînement sur la précision de l'utilisation des pédales

La variable dépendante *nombre d'interactions pieds-pédales* a quatre modalités (voir Mesures). La précision de l'utilisation des pédales lors de la panne 1 est plus grande que lors de la panne 2, $F(1,101) = 61.75, p < .001, \eta^2 = .11$ (Tableau 21).

Tableau 21 : Nombre d'interactions pieds-pédales

Mesure	<i>N</i>	<i>M (SD)</i>	Min-Max
1 ^{ère} panne	107	2.11 (1.45)	1-9
2 nd panne	101	4.36 (2.73)	1-18

L'entraînement n'a pas d'effet sur le nombre d'interactions avec les pédales lors de la première panne mais en a un pour la deuxième panne $F(1,101) = 6.66, p < .05, \eta^2 = .06$. En effet, les participants ayant suivi l'entraînement élaboré ont réalisé moins d'interactions avec les pédales pour reprendre le contrôle du véhicule ($M = 3.65, SD = 2.39, \text{Min} = 1, \text{Max} = 9$) que les autres ($M = 5.02, SD = 2.89, \text{Min} = 2, \text{Max} = 18$).

3.7.3. *Manière de reprendre le contrôle, temps de réponse et précision de l'utilisation des pédales en fonction de l'entraînement*

Pour l'ensemble des participants :

La variable indépendante invoquée *manière de reprendre le contrôle* a deux modalités (utilisation simultanée ou non des mains et des pieds). Il y a une corrélation négative entre cette variable et les temps de réponses lors des deux pannes, $r = -.31, p < .01$; $r = -.24, p < .05$. Il y a une différence significative des temps de réponse lors de la panne 1 en fonction de la manière de reprendre le contrôle $F(1,106) = 11.19, p < .001, \eta^2 = .10$ (Tableau 22). Les participants ayant utilisé simultanément les mains et les pieds sont plus rapides que ceux ayant utilisé seulement les mains ou les pieds, ou encore lorsqu'ils ont utilisé mains et pieds de manière non simultanée. Il y a également une différence significative dans le temps de réponse lors de la panne 2 en fonction de la manière de reprendre le contrôle, $F(1,105) = 6.3, p < .05, \eta^2 = .06$.

Tableau 22 : Temps de réponse (en s) en fonction de la simultanété des pieds et des mains lors de la reprise de contrôle manuel

Mesure	N	Non-simultanée		Simultanée	
		M (SD)	Min-Max	M (SD)	Min-Max
1 ^{ère} panne	109	5.54 (0.69)	2.5-9	4.3 (1.66)	1.8-10.9
2 nd panne	112	3.5 (1.4)	1.4-7.2	2.94 (0.81)	1.7-5.1

Par groupe expérimental :

Lors de la première panne, la reprise de contrôle simultanée mains et pieds est plus rapide que la non-simultanée. Ce résultat a été observé dans la condition d'entraînement simple, $F(1,57) = 5.99, p < .05, \eta^2 = .10$, mais également élaboré, $F(1,49) = 6.07, p < .05, \eta^2 = .11$. Lors de la deuxième panne, pour la modalité entraînement simple, la reprise de contrôle

simultanée mains et pieds est plus rapide que lorsqu'elle n'est pas simultanée, $F(1,56) = 19.22, p < .001, \eta^2 = .26$. Toutefois, une telle différence n'a pas été observée dans la condition d'entraînement élaboré.

3.7.4. *Effet de la réalisation d'une tâche sur les temps de réponse, la précision de l'utilisation des pédales et sur la manière de reprendre le contrôle*

Lors de la première panne, les automobilistes en train de réaliser la tâche d'anagrammes ont un temps de réponse significativement plus élevé que ceux n'ayant pas de tâche imposée, $F(1,109) = 7.9, p < .01, \eta^2 = .07$ (Tableau 23). Lors de la deuxième panne, les automobilistes en train de réaliser la tâche de labyrinthe ont un temps de réponse significativement plus élevé que ceux n'ayant pas de tâche imposée, $F(1,112) = 8.53, p < .01, \eta^2 = .07$.

Tableau 23 : Temps de réponse (secondes) en fonction de la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite

Mesure	N	Sans tâche		Avec tâche	
		M (SD)	Min-Max	M (SD)	Min-Max
1 ^{ère} panne	109	4.11 (1.78)	1.8-9	5.02 (1.59)	2.1-10.9
2 nd panne	112	2.77 (.88)	1.7-6.2	3.3 (1.01)	1.4-7.2

La réalisation d'une tâche non reliée à la conduite a eu un impact sur la manière de reprendre le contrôle manuel. Lors de la panne 1, les participants qui n'avaient pas de tâche imposée sont plus nombreux à avoir repris le contrôle de manière simultanée, $X^2(1, N=109) = 4.6, p < .05, V = .21$. Ce résultat n'a pas été observé pour la seconde panne.

Enfin, la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite n'a pas eu d'effet significatif sur la précision d'utilisation des pédales pour aucune des deux pannes, $F(1,106) = 1.36$, $p = .25$, pour la panne 1 ; $F(1,100) = .12$, $p = .73$, pour la panne 2.

Par ailleurs, nous avons souhaité savoir si le temps de réponse plus long des participants réalisant une tâche non reliée à la conduite pouvait s'expliquer par l'encombrement de leurs mains. Nous avons donc distingué à l'intérieur du groupe *simultané* ceux qui avaient posé les mains en premier de ceux qui avaient utilisé leurs pieds. Parmi ceux qui ont posé les mains en premier, ceux qui avaient une tâche à réaliser n'étaient pas plus rapides que ceux qui n'en avaient pas, $t(22) = .04$, $p = .97$, pour la panne 1 ; $t(17) = -.84$, $p = .41$, pour la panne 2 (Tableau 24). L'encombrement ne serait donc pas la seule explication possible des différences entre les temps de réponse en fonction de la réalisation d'une tâche.

Tableau 24 : Fréquences de la manière dont les participants ont repris le contrôle manuel

Mesure	N	Non-simultanée			Simultanée
		Accélérateur	Frein	Mains	Mains et pieds
1. 1 ^{ère} panne sans tâche	52	2	0	7	43
2. 1 ^{ère} panne avec tâche	57	3	1	16	37
3. 2 nd panne sans tâche	51	0	2	9	40
4. 2 nd panne avec tâche	55	5	1	9	40

3.7.5. *Impact de l'interaction entre l'entraînement et la réalisation d'une tâche sur la reprise de contrôle manuel en situation urgente*

Lors de la première panne, dans la condition entraînement simple, les participants qui réalisent la tâche d'anagrammes ont un temps de réponse significativement plus lent que ceux qui ne réalisent pas de tâche, $F(1,57) = 5.68, p < .05, \eta^2 = .09$ (Tableau 25). Il n'y a pas de différence significative dans le temps de réponse entre les participants réalisant une tâche et ceux n'en réalisant pas dans la condition entraînement élaboré.

Lors de la deuxième panne, dans la condition entraînement simple, la réalisation de la tâche de labyrinthe n'a pas d'effet significatif sur le temps de réponse, $F(1,57) = 3.07, p = .09$. En revanche, dans la condition entraînement élaboré, les participants qui n'ont pas réalisé la tâche de labyrinthe ont un temps de réponse significativement plus rapide que ceux qui l'ont réalisée, $F(1,54) = 7.42, p < .01, \eta^2 = .13$ (Tableau 26).

Tableau 25 : Temps de réponse (en s) pour les reprises de contrôle manuel lors de la première panne, en fonction de l'entraînement et de la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite

Mesure	N	Sans tâche		Avec tâche	
		M (SD)	Min-Max	M (SD)	Min-Max
Entraînement simple	57	4.34 (2.1)	1.8 – 9	5.58 (1.71)	2.7 - 10.9
Entraînement élaboré	52	3.83 (1.36)	1.8 – 7.2	4.37 (1.16)	2.1 - 6.8

Tableau 26 : Temps de réponse (en s) pour les reprises de contrôle manuel lors de la seconde panne, en fonction de l'entraînement et de la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite

Mesure	N	Sans tâche		Avec tâche	
		M (SD)	Min-Max	M (SD)	Min-Max
Entraînement simple	57	2.96 (1.1)	1.7 – 8.2	3.5 (1.1)	2 – 7.2
Entraînement élaboré	52	2.57 (.5)	1.8 – 3.9	3.12 (.9)	1.4 – 5.1

3.7.6. Effet de l'entraînement sur la confiance

Après avoir interagi avec la CCA, les participants ont eu un score relativement élevé de confiance dans le système, $M = 5.07$, $SD = 1.14$, $\text{Min} = 2$, $\text{Max} = 7$. De plus, les participants de la condition entraînement élaboré ont déclaré faire davantage confiance au système que ceux de la condition entraînement simple, $F(1,113) = 4.21$, $p < .05$, $\eta^2 = .04$.

On observe une différence significative dans la confiance mesurée en termes de nombre de regards dirigés vers la route lors de la réalisation de la première tâche (anagrammes). Les participants de la condition entraînement élaboré avec tâche ont significativement moins regardé la route, $M = 22.15$ ($SD = 15.41$, $\text{Min} = 1$, $\text{Max} = 70$), que ceux de la condition entraînement simple avec tâche ($M = 49.92$, $SD = 49.93$, $\text{Min} = 2$, $\text{Max} = 171$), indiquant une confiance plus importante dans le système, $F(1,50) = 8.16$, $p < .01$, $\eta^2 = .15$. De plus, la proportion de participants ayant souvent regardé la route (au moins 70 fois) est beaucoup plus importante dans la condition entraînement simple (29.2%) que dans la condition entraînement élaboré (3.8%). Un effet similaire de l'entraînement sur le nombre de regards portés sur la route est observé pour la deuxième panne, lorsque les participants réalisent la tâche de labyrinthe $F(1,49) = 5$, $p < .05$, $\eta^2 = .09$. La taille d'effet pour la deuxième

panne est moins importante, ce qui peut être expliqué par une réduction du laps de temps laissé pour faire la tâche (10 min pour la première tâche, 30 s pour la deuxième).

Le genre a eu un impact significatif sur le nombre de regards portés sur la route lors de la réalisation de la première tâche. Les hommes ont davantage regardé la route que les femmes, $F(1,50) = 4.08, p < .05, \eta^2 = .08$.

Enfin, les participants sont significativement plus nombreux à avoir repris le contrôle manuel de la conduite lorsque le système a indiqué par deux fois une baisse de fiabilité, $t(112) = 30.93, p < .001$ pour la première baisse de fiabilité, $t(109) = 31.99, p < .001$ pour la seconde baisse de fiabilité. L'entraînement n'a pas eu d'effet significatif sur la reprise de contrôle manuel ou non dans ces deux situations, $F(1,112) = 1.17, p = .28$; $F(1,109) = 1.7, p = .20$.

3.7.7. *Impact des caractéristiques des conducteurs sur les temps de réponse, la précision de l'utilisation des pédales et de la manière de reprendre le contrôle*

Il n'y a pas eu d'effet de l'âge, du genre ni de l'expérience de conduite antérieure (manuelle et avec des aides à la conduite) sur les temps de réponses, la précision de l'utilisation des pédales que ce soit pour la première ou la seconde panne.

En revanche, plus les participants sont âgés, plus ils reprennent le contrôle simultanément pour la panne 2. Ce résultat n'a pas été observé lors de la panne 1. Lors de la panne 1, plus les participants étaient âgés, plus ils ont été précis dans l'utilisation des pédales, bien que pour cette reprise de contrôle il y a eu globalement peu d'interactions avec les pédales.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Manière de reprendre contrôle 1ère panne										
2. Manière reprendre contrôle 2ème panne	.18									
3. Tps réponse panne 1	.31**	-.13								
4. Tps réponse panne 2	-.19*	-.24*	.34**							
5. Précision panne 1	-.01	-.18	.13	-.14						
6. Précision panne 2	.02	.03	.21**	.04	.12					
7. Genre	-.29	-.16	-.05	.04	.02	-.02				
8. Age	-.10	-.24*	-.02	-.00	.20*	.05	-.02			
9. Expérience conduite manuelle	.09	.19*	-.05	-.03	-.16	-.07	.04	-.97**		
10. Expérience avec ADAS	.01	.15	.03	-.02	.04	.23	-.38**	-.06	.05	

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$

3.8. Résumé des principaux résultats de l'étude 3

Résumé des principaux résultats de l'étude 3 : Cette étude (N = 113 conducteurs français avec un permis B valide, 51% de femmes) a exploré la conduite complètement automatisée (CCA) dans un simulateur de conduite. La performance de deux reprises de contrôle manuel (RCM) en situation d'urgence (panne du système) et la confiance dans le système de CCA ont été examinées. Un entraînement (simple vs. élaboré) a été au préalable dispensé aux participants, puis la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite (avec vs. sans) a été introduite lorsque le pilotage automatique était actif. La RCM a été mesurée avec trois indicateurs : le temps de réponse et la précision de l'utilisation des pédales du véhicule et la manière dont elle a été réalisée (mains et pieds utilisés simultanément ou non). L'entraînement élaboré a amélioré le temps de réponse lors des deux RCM en situation d'urgence et la précision de l'utilisation des pédales, lors de la deuxième RCM seulement, dans laquelle des véhicules se trouvaient devant le participant. La réalisation d'une tâche non reliée à la conduite lorsque la CCA était active a augmenté le temps de réponse de RCM, mais n'a pas affecté significativement la précision de l'utilisation des pédales. Le temps de réponse a également été influencé par la manière dont le contrôle a été repris (plus rapide lorsque les mains et pieds sont utilisés simultanément). Dans la condition entraînement élaboré, la confiance dans la CCA, déclarée et observée, a été positivement influencée, entre autres car la sous-confiance dans le système a été modérée.

3.9. Discussion

Nous observons tout d'abord une amélioration du temps de réponse pour reprendre le contrôle manuel entre la première et la seconde situation d'urgence. Cela peut être expliqué par un phénomène d'apprentissage global, indépendamment de la modalité d'entraînement. Plus cette nouvelle manœuvre est pratiquée, plus elle est réalisée rapidement. En revanche, rapidité ne veut pas dire précision : le temps de réponse est un indicateur parmi d'autres de la performance de la reprise de contrôle manuel d'urgence.

Les résultats vont dans le sens de la première hypothèse. En effet, l'entraînement élaboré diminue le temps de réponse lors d'une reprise de contrôle manuel en cas d'urgence. Cette baisse est également constatée lorsque le conducteur effectue une autre tâche que la conduite, à savoir résoudre des anagrammes ou un labyrinthe sur papier. De manière générale, la précision de l'utilisation des pédales est meilleure pour la panne 1 que pour la panne 2.

L'entraînement a également contribué à améliorer significativement la précision de l'utilisation des pédales, mais uniquement pour la panne 2 (qu'une tâche autre que la conduite ait été réalisée ou non), ce qui confirme partiellement la deuxième hypothèse. Pourquoi n'observons-nous pas cet effet dans la panne 1 ? La vitesse pourrait être un facteur qui explique la différence observée entre les deux pannes, mais il est plus probable selon nous que ce soit la gestion de la vitesse du véhicule, plus difficile dans la deuxième panne à cause de la présence de véhicules sur les deux files devant le participant, qui complique la reprise de contrôle manuel. Toutefois, la différence de vitesse pourrait également expliquer la variabilité de la précision de l'utilisation des pédales d'une panne à l'autre.

La manière de reprendre le contrôle et le temps de réponse sont corrélés négativement (H3). Lorsque la reprise de contrôle manuel est réalisée simultanément avec les mains et les pieds, le temps de réponse est plus court. Toutefois, il n'y a pas eu de corrélation entre la

manière de reprendre le contrôle manuel et la précision dans l'utilisation des pédales pour les deux pannes. On pourrait considérer que la manière de reprendre le contrôle manuel a impacté le temps de réponse. Ce résultat a été observé pour les deux pannes malgré les différences entre les deux situations : lors de la première panne, la vitesse était élevée (110 km/h pour la première panne vs. 50 km/h pour la deuxième), et le temps passé en mode de CCA était supérieur par rapport à la seconde panne (10 min vs. 1 min).

La manière de reprendre le contrôle a eu un effet sur le temps de réponse pour la première panne dans les deux conditions d'entraînement, mais uniquement pour la condition d'entraînement simple lors de la panne 2. Il est possible que la pratique de la reprise de contrôle manuel en situation d'urgence et la manière de reprendre le contrôle aient diminué l'influence de l'entraînement élaboré sur le temps de réponse. Ce résultat contribue à justifier le format d'entraînement court suivi par tous les participants. Bien que le délai d'une seconde choisi pour déterminer si une reprise de contrôle est simultanée ou non puisse être contesté, cet indicateur a montré que les participants qui ont coordonné leurs mains et leurs pieds pour reprendre le contrôle manuel ont été plus rapides que ceux qui les ont utilisés de manière non simultanée. Un autre argument permettant d'expliquer les temps de réponse plus courts pour la deuxième panne serait que cette panne était probablement considérée comme potentiellement plus dangereuse que la première, car des véhicules se trouvaient sur les deux voies devant celui des participants. En effet, les temps de réponse des conducteurs sont plus courts dans des situations de conduite perçues comme dangereuses par rapport à des situations perçues comme non dangereuses (Dingus *et al.*, 1998). Les temps de freinage sont également plus courts dans des situations de trafic dense plutôt que fluide (Davis *et al.* 1990). Les résultats de notre étude corroborent ceux précédemment observés.

La réalisation d'une tâche non liée à la conduite en mode de pilotage automatique augmente le temps de réponse lors d'une reprise de contrôle manuel en cas d'urgence, ce qui

confirme en partie notre quatrième hypothèse (H4a). Ce résultat pourrait être en partie expliqué par la charge de travail mental et physique ajoutée par la réalisation d'une tâche. Si les participants n'ont pas utilisé les pieds et les mains simultanément, ou seulement leurs pieds en premier, c'est peut-être qu'ils devaient être gênés par le stylo et la planche permettant de réaliser les deux tâches non reliées à la conduite (H4b). En effet, les gestes et postures des participants dans cette condition avec tâche à réaliser pourraient tout aussi bien expliquer pourquoi ils ont été plus lents à réagir. Dans la mesure où ils tenaient un stylo, une planche pour écrire et que leurs pieds n'étaient pas posés sur les pédales, prendre une décision pour choisir si on doit se débarrasser de ces objets, et si oui comment, pourrait être difficile. Ceci est en accord avec la corrélation négative trouvée pour la panne 1 entre la manière de reprendre le contrôle et la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite (plus de conducteurs ont repris le contrôle simultanément quand ils n'avaient pas de tâche à réaliser). Cependant, il y a des effets d'interaction entre la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite et l'entraînement, sur les temps de réponse différents lors des deux pannes. Pour la panne 1, la réalisation ou non d'une tâche non reliée à la conduite n'a pas d'effet significatif sur le temps de réponse lorsque les participants ont suivi l'entraînement élaboré. Pour la panne 2, la réalisation de la tâche n'a pas significativement influencé le temps de réponse des participants de la condition d'entraînement simple, alors que dans la condition d'entraînement élaborée, ils ont été plus rapides lorsqu'ils ne réalisaient pas de tâche. Ces interactions pourraient être expliquées par l'entraînement élaboré qui modère l'effet de la réalisation de la tâche non reliée à la conduite sur le temps de réponse, et qui diminue le temps de réponse même lorsque celui-ci est impacté par la dangerosité perçue de la situation (Dingus *et al.*, 1998 ; Davis *et al.*, 1990). Enfin, la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite lors des deux pannes n'a pas significativement influencé la précision de l'utilisation des pédales. De fait, l'hypothèse H4c n'est pas confirmée.

La confiance observée dans le système de CCA a été plus importante lorsque les participants ont suivi l'entraînement élaboré, ce qui valide nos attentes (H5a&b). Toutefois, la taille de l'effet est moins importante lors de la réalisation de la deuxième tâche, ce qui pourrait être expliqué par le délai plus court laissé aux participants pour la réaliser (10 min vs. 30 s). La connaissance du système, de sa logique de fonctionnement et de ses caractéristiques ainsi que la pratique de cas d'usage semblent avoir eu un impact positif sur la confiance accordée au système. En effet, bien que la confiance ait été plus importante pour ceux ayant suivi l'entraînement élaboré, les participants ayant suivi l'entraînement simple ont parfois regardé la route très souvent (jusqu'à 170 fois pendant la première tâche), ce qui pourrait être un indicateur de sous-confiance. L'entraînement pourrait donc avoir modéré un tel comportement de suspicion à l'égard de la CCA, tout en favorisant une *confiance appropriée* (Muir, 1994). Ensuite, les femmes ont davantage fait confiance au système de CCA que les hommes car elles ont moins regardé la route qu'eux pendant la réalisation des tâches non reliées à la conduite. Ce résultat invalide l'hypothèse 7a, et n'est pas similaire avec les résultats précédemment trouvés sur la confiance *a priori* dans la CCA (Payre *et al.*, 2014). Toutefois, dans cette troisième étude, les participants ont eu une interaction avec la CCA dans un simulateur ce qui pourrait expliquer en partie une telle différence. Enfin, davantage de conducteurs ont repris le contrôle manuel du véhicule plutôt que de ne pas intervenir lorsque le système a indiqué avoir une fiabilité faible (H5c). L'entraînement n'a pas eu d'effet significatif sur la reprise de contrôle manuel ou non du véhicule dans ces deux événements. La possible dangerosité perçue de ces situations par les conducteurs les a probablement incités à reprendre la main.

La présence de voitures devant le véhicule des participants (panne 2) a entravé la reprise de contrôle manuel, influençant la précision de l'utilisation des pédales. Comme attendu, (H6) l'entraînement élaboré a eu un effet positif sur cette dimension de la

performance de reprise de contrôle manuel. Lors de la deuxième panne, bien que la vitesse ait été plus faible (environ 50 km/h), il y avait systématiquement un véhicule à 38 m devant celui des participants devancé par deux files de voitures proches les unes des autres, comme ce qu'il est habituel de voir dans ce type d'embouteillages. De fait, il est vraisemblablement plus difficile de reprendre le contrôle en essayant de ne pas percuter une voiture devant son véhicule que lorsque la voie est libre, comme c'était le cas dans la première situation d'urgence (il n'y avait pas de véhicules derrière celui du participant). La précision de l'utilisation des pédales est le deuxième indicateur de performance de la reprise de contrôle manuel en situation d'urgence. Cet indicateur qualitatif fait référence à la maîtrise du véhicule, alors que le temps de réponse est un indicateur quantitatif. Contrairement au contrôle latéral de la voiture, la mesure de la précision de l'utilisation des pédales n'est pas biaisée par l'ajustement nécessaire pour voir à travers ou au-delà du véhicule situé devant l'automobiliste lorsque l'inter-distance est faible (Brandenburg *et al.*, 2014). Pour déterminer l'ensemble des facteurs constitutifs de la qualité de la reprise de contrôle manuel, d'autres recherches seront nécessaires, et en particulier sur la maîtrise du véhicule.

Contrairement à nos attentes (H7b&c), l'âge n'a pas affecté significativement les temps de réponse, contrairement à l'étude de Warshawsky-Livne *et al.* (2002), bien que les conditions de notre expériences étaient différentes. L'expérience de conduite, avec ou sans aides de type ADAS, n'a eu d'impact significatif ni sur le temps de réponse, ni sur la précision d'utilisation des pédales. Ce résultat ne confirme pas celui observé par Larsson *et al.* (2014) sur le temps de réponse plus rapide des automobilistes dans un véhicule hautement automatisé lorsqu'ils ont déjà eu l'expérience d'aides à la conduite. L'expérience de conduite manuelle et avec des ADAS n'a pas eu d'influence significative sur les performances de conduite complètement automatisée. Cependant, ce résultat justifie davantage la nécessité

d'un entraînement à la CCA dans la mesure où cela a amélioré les performances de reprise de contrôle manuel sans que l'expérience de conduite ne soit prise en compte.

Le temps passé à s'entraîner et à pratiquer la CCA pourrait paraître court pour un premier entraînement à la CCA. Pourtant, le temps passé n'est pas nécessairement la garantie d'un entraînement efficace, comme l'a souligné la FAA (2013b) mettant en évidence que la durée n'est *pas la seule considération – la méthodologie d'entraînement et les dispositifs d'entraînement utilisés sont aussi très importants*. Qui plus est, ce type d'entraînement court est pragmatique dans la mesure où il pourrait correspondre à ce que les vendeurs de voitures pourraient proposer aux conducteurs achetant pour la première fois des véhicules complètement automatisés.

Dans cette troisième étude, des limites sont à prendre en considération. Tout d'abord, elle s'est déroulée dans un simulateur, ce qui a pu amoindrir le sentiment de danger léthal perçu par les conducteurs. Ensuite, l'échantillon aurait pu être plus important pour être davantage représentatif de la population et prendre en compte de plus larges écarts dans les données.

A bord d'une voiture complètement automatisée, le conducteur pourrait passer du statut de conducteur actif à celui de passif. Le statut de conducteur passif est pertinent lorsque la supervision du système n'est pas obligatoire. Afin de modérer les effets indésirables du manque de contrôle sur la conduite, les systèmes de conduite automatisée devraient prévoir une fenêtre de temps acceptable pour la reprise de contrôle manuel, permettant aux conducteurs de se remettre dans de bonnes dispositions cognitives et posturales. Cela consisterait à systématiquement prévenir les conducteurs suffisamment tôt avant une reprise de contrôle manuel, même dans une situation où le système éprouve ses limites. Gold *et al.* (2013b) ont montré qu'un temps de 7 s pour reprendre le contrôle permettait au conducteur d'éviter un objet statique sur la route. Compte tenu des temps de réponse les plus lents

observés dans cette troisième étude (environ 11 s pour les deux pannes dans la condition entraînement simple), nous pouvons préconiser un temps minimum de reprise de contrôle manuel de 11 s. Toutefois, l'échantillon utilisé dans cette n'était pas représentatif et la généralisation de nos résultats doit se faire avec prudence. La reprise de contrôle manuel pourrait être influencée par les conditions de circulation et l'environnement routier (virages, pluie, densité du trafic, etc.). Quoiqu'il en soit, il faudra prévoir une sécurité lorsque le système ne sera plus en mesure de prendre en charge la conduite, et/ou si le conducteur n'est pas parvenu à reprendre le contrôle manuel dans le temps imparti. Cette manœuvre d'urgence réalisée par le véhicule complètement automatisée serait de se mettre en position de sécurité, par exemple sur le côté de la route et à l'arrêt, sans que l'automobiliste n'ait besoin d'intervenir. Toutefois, l'acceptabilité d'une telle situation par les conducteurs reste inconnue.

3.10. Perspectives

La première implication de cette étude concerne le rôle du conducteur dans un véhicule complètement automatisé. Lorsque le système est enclenché, l'automobiliste peut décider de s'engager dans une activité non reliée à la conduite, et donc de réduire son degré de supervision sur le système, quand bien même cette supervision serait légalement obligatoire. Ainsi, dans le cas où une autre tâche est réalisée, la conduite devient une tâche latente le cas échéant. Elle redevient une tâche principale lors d'une reprise de contrôle manuel.

La question de la professionnalisation de l'enseignement de la CCA peut se poser. Utiliser un système de conduite complètement automatisé ne se résume pas à enclencher et désactiver le système. Les transitions entre les modes de pilotage peuvent être délicates et, de fait, potentiellement dangereuses pour les personnes à bord du véhicule complètement automatisé comme pour tous les autres usagers de la route en interaction avec le véhicule (piétons, cyclistes, motocyclistes, automobilistes, etc.). Compte tenu des différences de

performances observées dans la présente étude, il semble important de former les automobilistes afin d'améliorer la sécurité d'utilisation de ces véhicules. Une solution envisageable serait de proposer un accès progressif au droit de conduire une voiture complètement automatisée. Ainsi, les possibilités d'utilisation du système seraient fonction de l'expérience de l'automobiliste avec son véhicule complètement automatisé.

Chapitre VI :

Discussion générale et conclusion

Chapitre VI : Discussion générale et conclusion

Discussion générale

La conduite complètement automatisée entend améliorer l'expérience de conduite en fluidifiant la circulation, en permettant aux conducteurs de déléguer la conduite lorsqu'elle est monotone, en renforçant la sécurité routière, en réduisant la consommation d'essence ainsi que les émissions de CO₂, et enfin en permettant éventuellement de faire autre chose que conduire lorsque l'on est derrière le volant. Cette technologie implique une nouvelle interaction entre les conducteurs et ce nouveau type de véhicule capable de circuler sans intervention humaine. Le rôle du conducteur pourrait radicalement changer dans la mesure où il ne conduirait plus son véhicule, mais deviendrait conduit par celui-ci. Lorsqu'il est conduit, le conducteur pourrait toujours être actif, soit en supervisant plus ou moins assidument la conduite (que ce soit obligatoire ou non), soit en s'engageant dans une autre tâche non reliée à la conduite. Dans cette dernière situation, la conduite deviendrait alors secondaire. C'est ce changement d'état que nous avons en partie examiné dans cette thèse.

Plusieurs objectifs ont été poursuivis dans cette thèse. Le premier a été d'étudier dans quelle mesure la conduite complètement automatisée serait acceptée. Nous avons ainsi analysé l'acceptabilité, la confiance et les utilisations de cette nouvelle technologie en prenant en compte les attitudes et intentions des automobilistes à l'égard d'une voiture complètement automatisée. Bien que le conducteur puisse être conduit par son véhicule, il pourrait être amené à en reprendre le contrôle manuel, dans des situations d'urgence ou de manière anticipée. La réalisation de cette manœuvre pourrait être plus ou moins difficile selon la

situation et l'expérience d'interactions avec le système complètement automatisé. Le second objectif a donc été d'étudier la manière dont l'automobiliste reprend le contrôle manuel du véhicule, selon les différents événements rencontrés. Enfin, un troisième objectif a été d'examiner la manière dont cette manœuvre pourrait être apprise par des conducteurs, en testant l'effet de différentes formes d'entraînement sur la performance et la sécurité (temps de réponse et précision de l'utilisation des pédales). Pour tenter d'atteindre ces objectifs, trois études ont été réalisées.

La technologie utilisée pour équiper les voitures est toujours en cours de développement, et la législation qui encadre leurs usages n'est pas encore établie, ce qui implique que la présente thèse ait un caractère exploratoire. Nous avons d'abord procédé à une enquête (421 participants), basée sur deux études pilotes, puis nous avons fait essayer la conduite complètement automatisée (CCA) à des conducteurs dans les deux études suivantes sur simulateur de conduite. Nous avons eu recours à des échantillons de taille relativement importante (69 et 113 participants), en comparaison des études similaires sur simulateur dans ce domaine. Nous avons conçu une méthode de formation à la CCA qui a obtenu des effets positifs sur la sécurité et la performance de conduite lors d'une première utilisation. Ces études ont été réalisées en 2013 et 2014 et, depuis, la littérature a pu apporter certains éléments de réponse à nos questions mais dans des contextes différents.

Synthèse des trois études

L'enquête réalisée en ligne dans la première étude a permis d'évaluer des attitudes envers la CCA (acceptabilité *a priori*, confiance, intention d'achat) et les intentions d'utilisation. *A priori*, les conducteurs que nous avons interrogés sont plutôt favorables à la conduite complètement automatisée : ils la trouvent utile et seraient prêts à l'utiliser, surtout dans des conditions de conduite monotone, et parfois même lorsqu'ils ne seraient pas en

mesure de conduire, ce qui serait un usage de la CCA potentiellement détourné. Cependant, des réserves sont émises quant à l'utilisation de ce nouveau type de conduite en ville, qui est un environnement dense, particulièrement dynamique et incertain. L'acceptabilité de cette technologie n'est pas inconditionnelle, et la confiance qui lui est donnée n'est pas absolue pour toutes et tous. Le sentiment de responsabilité lorsque la conduite complètement automatisée est active n'y est vraisemblablement pas étranger et, malgré les consignes données dans le cadre de nos études, il semble encore délicat d'émettre des conclusions définitives sur ces attitudes tant que cette incertitude législative ne sera pas dissipée. Les intentions d'utilisation sont prédites par les deux dimensions de notre échelle d'acceptabilité *a priori*, la recherche de sensations au volant et enfin le genre. Notre protocole expérimental propose un futur possible, et les attitudes recueillies sont fonction de ce futur possible. Les attitudes pourront être différentes si le futur véhicule est différent. Ces résultats soulèvent des questions sur les attitudes des automobilistes après avoir utilisé la CCA. L'utilisation de cette technologie permet aussi d'analyser des comportements et leurs interactions avec les attitudes (acceptabilité et confiance), notamment la reprise de contrôle manuel qui constitue alors une nouvelle manœuvre. Comme les automobilistes n'ont jamais pratiqué cette manœuvre, la question de l'apprentissage de la CCA s'est posée. L'étude suivante a consisté à explorer une manière par laquelle des conducteurs pourraient apprendre à utiliser cette technologie.

La deuxième étude a été réalisée sur simulateur de conduite. Elle a permis à des conducteurs d'utiliser la CCA pour la première fois. Deux groupes ont été constitués : l'un a suivi une pratique simple de la CCA, l'autre une pratique élaborée. Concernant les attitudes, la CCA est acceptée *a priori* et *a posteriori*, et la confiance déclarée dans le système est globalement positive. Pendant le scénario, les 69 participants ont été confrontés de manière inattendue à une panne du système, et nous avons analysé la performance de reprise de contrôle manuel, mesurée en temps de réponse. Une interaction entre la confiance et le temps

de réponse a été observée. Pour les conducteurs de la condition pratique simple, plus la confiance est élevée, plus le temps de réponse est long, ce qui n'est pas le cas pour les participants de la condition pratique élaborée. La pratique élaborée a donc modéré l'impact négatif de la surconfiance sur le temps de réponse. La pratique de la CCA permet une utilisation plus sûre de ce nouveau type de conduite. Toutefois, nous avons cherché à savoir si une pratique plus approfondie du système, couplée à une formation théorique sur la logique de fonctionnement du système, pouvait améliorer les performances de reprise de contrôle manuel, et permettre une confiance plus adaptée dans le système. La réalisation d'une tâche non reliée à la conduite lorsque le pilotage automatique est activé pourrait également impacter la reprise de contrôle manuel, notamment parce que les conducteurs sont occupés à manipuler des objets entravant cette manœuvre. Ce sont des hypothèses que nous avons testé dans l'étude 3.

La troisième étude s'est déroulée également sur simulateur de conduite. Les participants ($N=113$, 49% d'hommes) ont été répartis selon deux conditions d'entraînement (simple vs. élaboré), et selon la réalisation (vs. non réalisation) de tâches non reliées à la conduite. La condition entraînement élaboré est constituée d'une pratique plus approfondie et variée que la condition entraînement simple. De plus, les participants assignés à cette condition ont pu lire un texte expliquant le fonctionnement de la CCA, et visionné une vidéo montrant comment reprendre le contrôle manuel du véhicule. La moitié des participants a réalisé deux tâches non reliées à la conduite à deux moments différents lorsque le mode de pilotage automatique était actif. Ces tâches sont devenues les tâches principales, et la conduite est une tâche latente pouvant être reprise à tout moment. Le nombre de regards portés sur la route a été mesuré pour les participants réalisant une tâche non reliée à la conduite. Cette mesure est un indicateur du degré de supervision du système. Un degré élevé de supervision pourrait être lié à un manque de confiance. Deux pannes du système ont eu lieu, nécessitant

une intervention des conducteurs, dont la moitié était en train de réaliser une tâche non reliée à la conduite à ce moment. Les indicateurs de performance de reprise de contrôle manuel sont le temps de réponse et la précision de l'utilisation des pédales (c'est-à-dire le nombre d'interactions avec les pédales lors de la reprise de contrôle manuel). La manière de reprendre le contrôle (simultanée ou non) a également été analysée et contribue à la rapidité du temps de réponse de la reprise de contrôle. L'entraînement élaboré, comparé à l'entraînement simple, améliore les temps de réponse et la précision de l'utilisation des pédales. La confiance dans le système des participants ayant suivi l'entraînement élaboré est également mieux calibrée (c'est-à-dire que le phénomène de surconfiance est modéré) que celle des participants ayant suivi l'entraînement simple.

Apports méthodologiques et pratiques

Il pourrait sembler évident qu'entraîner des individus à une activité qu'ils ne connaissent pas, ou peu, améliore leurs performances, par rapport à des individus qui ne le sont pas ou dans une moindre mesure. Pourtant, cette évidence n'est que trop peu visible dans la littérature concernant la conduite hautement et complètement automatisée. Cet objet nouveau n'est pas encore accessible au grand public, et n'a pas encore donné lieu à beaucoup de publications. Il est toutefois possible de trouver pléthore d'études sur les aides à la conduite, parfois étudiant l'association du contrôle latéral et longitudinal du véhicule (Brandenburg *et al.*, 2014, Jamson *et al.*, 2013, Skottke *et al.*, 2014). La performance de la conduite automatisée, mesurée dans ces cas en termes de contrôle du véhicule (contrôle latéral, longitudinal, capacité à éviter des objets lorsque les conducteurs reprennent le contrôle), est investiguée en fonction de différents degrés d'automatisation, ou en fonction de la réalisation de tâches dites secondaires. Il y a donc la volonté de comparer des groupes et des conditions, mais la notion de performance en tant que variable dépendante sur le même type de véhicule automatisé est moins abordée. Dans la présente thèse, nous avons cherché à

comparer sur un même véhicule les différences dans les attitudes, les comportements et les performances des conducteurs en fonction d'une formation suivie. Cette formation a pour ambition de faciliter la première prise en main d'une voiture complètement automatisée. Nos études sont pragmatiques en ce sens qu'elles peuvent être facilement appliquées pour permettre aux conducteurs d'acquérir d'une part des connaissances essentielles sur le potentiel et les limites du système et, d'autre part, d'acquérir des compétences nouvelles pour utiliser la CCA. Bien que la loi n'ait pas encore tranché quant à la nécessité d'une telle démarche, nos études invitent à réfléchir sur le besoin d'apprendre à utiliser une telle technologie compte tenu des différences de comportement observées dans un simulateur de conduite. Les résultats obtenus suggèrent qu'entraîner, en pratiquant les nouvelles manœuvres introduites par l'utilisation de cette technologie, en comprenant sa logique de fonctionnement et en étant sensibilisé aux dangers potentiels d'un usage détourné, a des effets positifs sur l'utilisation de la conduite complètement automatisée. Ces effets positifs sont : une meilleure sensibilité quant aux dangers d'un usage détourné de ce nouveau type de véhicules, une confiance plus adaptée dans la technologie et une amélioration de la performance de reprise de contrôle manuel en situation d'urgence (rapidité et précision de l'utilisation des pédales).

Apports théoriques

L'un des enseignements de nos recherches est que l'expérience antérieure de conduite manuelle et assistée par des aides à la conduite ne semble pas avoir, dans nos conditions d'expérimentation, aidé ou entravé les performances de la conduite complètement automatisée. Nous n'avons donc pas observé de transfert d'apprentissage. Au regard de ce résultat, élaborer une formation spécifique à la conduite complètement automatisée semble tout à fait pertinent. Cette formation devrait inclure les principes de base de fonctionnement d'une voiture complètement automatisée, les conditions optimales d'utilisation, et la pratique de manœuvres nouvelles comme la reprise de contrôle manuel dans différentes conditions de

trafic ou lorsqu'une autre activité que la conduite est engagée. Les médias utilisés lors de l'apprentissage pourraient être des textes explicatifs et des vidéos. Il pourrait également être pertinent d'utiliser des véhicules instrumentés et des simulateurs capables de créer une réalité virtuelle et sécurisée, définie comme un monde numérique factice qui est *imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel* (Fuchs, 1996). Enfin, il faudrait que les futures recherches dans le domaine incluent un feedback que les conducteurs auraient rapidement après une reprise de contrôle sur la performance de leur manœuvre, afin qu'ils puissent apprendre leurs points forts et leurs points faibles et corriger au besoin. Ce feedback, ou évaluation de la performance, pourrait également être restitué aux conducteurs par un formateur après une session d'entraînement. Une formation de ce type serait davantage centrée sur les caractéristiques individuelles des conducteurs.

Par ailleurs, les caractéristiques des individus, comme le genre et l'âge, n'ont pas eu d'impact sur les performances de reprise de contrôle, ce qui est congruent avec l'étude de Warshawsky-Livne et Shinar (2002). L'absence de corrélations positives entre l'âge et les temps de réponse peut paraître étonnante, mais pourrait être expliquée par le contexte d'urgence qui a permis, peut-être, de niveler les différences interindividuelles. De plus, la diminution du temps de réponse lors de la panne 2, dans une situation inattendue au sein d'un trafic dense, est aussi congruente avec les résultats observés dans les études de Dingus *et al.* (1998) et Davis *et al.* (1990). Nos résultats observés dans le domaine de la CCA sont donc conformes à ceux observés pour des niveaux d'automatisation moins élevés.

La théorie des réserves de ressources malléables de Young *et al.* (2002b) stipule que passer d'une situation de faible charge de travail à une situation de forte charge de travail provoque un déséquilibre dans l'allocation des ressources mentales d'un individu. Ce déséquilibre peut mener à une diminution de la performance. Cette théorie n'a pas été confirmée dans le cadre de la conduite complètement automatisée. Dans l'étude 3, les

personnes n'ayant pas de tâches non reliées à la conduite à réaliser ont repris le contrôle manuel plus rapidement que ceux étant en train de les réaliser lorsque le système est tombé en panne. Ainsi, le fait de ne rien faire pendant des durées de 10 min et de 30 s avant la panne, entraînant potentiellement une situation de sous-charge mentale, n'a pas augmenté davantage les temps de réponse que la réalisation d'une tâche non reliée à la conduite pendant ces périodes. D'après cette théorie, réaliser une tâche contribuerait à maintenir un niveau de charge de travail plus élevé, et donc de garder une allocation de ressources mentales plus importante. De fait, lors de la panne, l'individu solliciterait une certaine quantité de ressources mentales qui n'aurait pas dû être beaucoup augmentée pour faire face à la situation d'urgence. Ce faible déséquilibre dans l'allocation des ressources aurait dû permettre aux participants, en théorie, de réagir plus rapidement, ce qui n'a pas été le cas dans l'étude 3. Ce résultat pourrait être expliqué par la gêne physique induite par la tâche non reliée à la conduite, qui demandait d'écrire et de maintenir une planche sur ses genoux alors qu'il était nécessaire de manipuler les commandes du véhicule pour en reprendre le contrôle. Une autre explication serait qu'il était plus difficile de prendre une décision sur l'action à réaliser lors de la panne, c'est-à-dire comment gérer la tâche non reliée à la conduite et comment se débarrasser des objets qui étaient manipulés. La prise de décision pourrait également être affectée par la difficulté d'avoir une bonne conscience de la situation lorsque les individus passeraient d'une tâche exigeante à une autre, entraînant une forte augmentation de la charge de travail, voire une surcharge de travail. Enfin, l'urgence de la situation potentiellement perçue par les participants aurait peut-être contribué à diminuer les temps de réponse, et donc à modérer les effets délétères d'une faible charge de travail sur la performance de reprise de contrôle manuel au moment où cette manœuvre était nécessaire.

Limites

Nous posons quelques limites à nos études. Les plans de recherches utilisés ne nous permettent pas d'évaluer les effets de l'entraînement sur le moyen et long terme. Il y aurait des avantages à mesurer plus précisément l'impact de l'entraînement en réalisant des études longitudinales. Nos résultats indiquent que la pratique puis l'entraînement améliorent les critères et dimensions précédemment cités. Dès lors, la question de l'apprentissage peut se poser. Les participants de nos études ont-ils réellement appris à utiliser un véhicule complètement automatisé ? Les connaissances théoriques et pratiques qu'ils ont reçues sont-elles ancrées dans leur mémoire à long terme ? En ce qui concerne les connaissances théoriques, il est probable qu'elles soient plus facilement stockées que les connaissances pratiques dans le système nerveux central. En revanche, des doutes peuvent être émis quant à l'intégration dans la mémoire procédurale des manœuvres de reprise de contrôle manuel en situation d'urgence. Il est possible que certains des bénéfices observés soient dus à la répétition des manœuvres, en l'occurrence la pratique, plutôt qu'à un apprentissage de fond. En effet, la pratique pourrait n'avoir eu qu'un effet à court terme, alors qu'un apprentissage aurait des effets plus pérennes. Toutefois, le fait d'avoir expliqué dans la dernière étude comment fonctionne le système, son potentiel et ses limites, permet d'envisager raisonnablement qu'il y a eu apprentissage grâce aux connaissances théoriques dont l'encodage a été facilité par la pratique immédiate de la conduite complètement automatisée. La visualisation d'une vidéo n'a pas a priori favorisé l'apprentissage vicariant de la CCA. La vidéo montrait une reprise de contrôle simultanée avec les mains et les pieds, et sa visualisation n'a pas impacté significativement la manière de reprendre le contrôle. La théorie et la pratique nous apparaissent comme étant complémentaires et indissociables lorsqu'il s'agit d'entraîner des conducteurs à utiliser cette nouvelle technologie de transport, et nous avons cherché à opérationnaliser une méthode d'apprentissage partant de ce postulat. Les

formations mises en place et les réformes proposées par certaines institutions, par exemple la FAA, pour améliorer et maintenir les performances des pilotes d'avion professionnels utilisant des systèmes de pilotage automatique, corroborent cette association. Enfin, les deux dernières études ont été réalisées sur simulateur, il est donc possible que des études sur piste ou sur route ne retrouvent pas les mêmes résultats.

Perspectives

Différentes perspectives seraient à prendre en compte par les prochaines recherches sur la conduite complètement automatisée. Nous avons évalué plusieurs attitudes envers ce nouveau mode de transport, et leurs conséquences, notamment les intentions d'utilisations détournées, c'est-à-dire lorsque le conducteur n'est pas en mesure d'assurer la conduite manuelle de son véhicule.

Il est aujourd'hui possible pour des spécialistes de prendre le contrôle de certains véhicules, sans en être le conducteur, une opportunité qui pourrait entraîner d'autres utilisations détournées. Miller et Valasek, deux chercheurs en informatique, ont en effet récemment mis en évidence la vulnérabilité des systèmes informatiques à bord de voitures de dernières générations (notamment les modèles Jeep Cherokee et Toyota Prius), en réussissant à prendre le contrôle du véhicule sous certaines conditions ou à désactiver certaines fonctions de la conduite, comme le freinage ou l'accélération (Greenberg, 2015). La possibilité de pirater de telles voitures, lourdement équipées en systèmes informatiques, pose la question des conséquences du contrôle à distance d'un véhicule complètement automatisé, avec ou sans conducteur à son bord : taxis fantômes, actes criminels, etc. Dans le domaine de l'aviation civile, la prise de contrôle de certaines fonctionnalités d'un Boeing 737 en utilisant une application sur smartphone a également été réalisée par un informaticien, qui partage maintenant son expertise avec la FAA aux Etats-Unis (Foster, 2015). Le contrôle à distance

de véhicules automatisés est un risque qui devrait être anticipé par les concepteurs, car ces actes de piratage informatique peuvent potentiellement diminuer l'acceptabilité et la confiance des conducteurs dans le système. Le financement du Future of Life Institute, une organisation de recherche qui examine les potentiels risques du développement d'intelligences artificielles du niveau d'un être humain, témoigne d'une prise de conscience du décalage entre le progrès technique et les problématiques soulevées par leur diffusion au grand public. Cette posture d'avertisseur et de préventeur quant aux potentiels usages délétères d'une technologie n'est pas sans rappeler celle déjà adoptée dans *Frankenstein* ou le Prométhée moderne (Shelley, 1818).

La capacité de prise de décision d'un véhicule complètement automatisé soulève des questions éthiques (University of Alabama at Birmingham, 2015), et introduit une perspective plus large sur la robotique et l'intelligence artificielle. Dans le cas d'une collision inévitable, le système informatique serait à même de prendre des décisions et pourrait éventuellement choisir, par exemple, de protéger le véhicule qu'il dirige, ou au contraire décider de protéger les autres usagers de la route (autres véhicules, piétons, cyclistes, etc.). D'un point de vue déontologique, il n'est pas possible de dire si sauver plusieurs vies vaut mieux qu'une seule, ou si telle personne mérite plus d'être sauvée qu'une autre. Le point de vue utilitariste met en avant deux raisonnements : l'utilitarisme comme règle et l'utilitarisme comme acte. La règle stipule que cinq vies valent plus qu'une. L'acte stipule que chaque cas est spécifique, et qu'il faut prendre en compte tous les éléments en jeu. Par exemple, est-il préférable de sauver cinq criminels plutôt qu'une personne n'ayant pas commis de crime ? Le véhicule automatisé peut-il compromettre la sécurité de ses passagers pour assurer la sécurité d'un nombre plus important de personnes impliquées dans un accident ? Dans quelle mesure un véhicule complètement automatisé peut-il avoir connaissances de ces éléments ? La décision prise par un système informatique ne serait-elle pas celle des individus qui l'ont conçu ? A cet égard,

les quatre lois de la robotique proposées par l'écrivain Isaac Asimov (1986) peuvent apporter un éclairage intéressant :

- *Loi Zéro : Un robot ne peut pas porter atteinte à l'humanité, ni, par son inaction, permettre que l'humanité soit exposée au danger.*
- *Première Loi : Un robot ne peut porter atteinte à un être humain, ni, restant passif, permettre qu'un être humain soit exposé au danger, sauf contradiction avec la Loi Zéro.*
- *Deuxième Loi : Un robot doit obéir aux ordres que lui donne un être humain, sauf si de tels ordres entrent en conflit avec la Première Loi ou la Loi Zéro.*
- *Troisième Loi : Un robot doit protéger son existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la Première ou la Deuxième Loi ou la Loi Zéro.*

Ces lois sont une illustration littéraire du savoir-coopérer, un niveau de compétence de la conduite complètement automatisée que nous avons articulé avec la matrice GDE. Le savoir-coopérer correspond aux interactions entre l'utilisateur et son véhicule, mais également entre l'utilisateur et les autres usagers de la route. A ce titre, il est envisageable que de nouveaux comportements apparaissent avec l'introduction des véhicules complètement automatisés sur les routes publiques. L'acceptabilité de la conduite complètement automatisée pourrait aussi être différente en fonction des choix du système pour assurer la sécurité des passagers et/ou des autres usagers de la route en cas d'accident. En outre, il est vraisemblable que les conducteurs de tout type de véhicules manuels (motos, vélos, voitures, etc.) ainsi que les piétons essaient de tester le comportement des véhicules complètement automatisés. Une fois familiarisés aux réactions de ces nouvelles voitures, il serait possible d'exploiter le comportement routier d'un véhicule complètement automatisé pour jouer avec cette technologie, la mettre au défi, mais aussi en tirer profit dans certaines situations. Par exemple, un véhicule complètement automatisé va respecter le code de la route et tout mettre en œuvre

pour éviter un accident. Connaissant ces règles et après avoir vu cette technologie fonctionner efficacement, il n'est pas impossible que des conducteurs en mode manuel en tirent profit, par exemple en ne respectant pas leur priorité s'ils viennent de la droite, car ils seront programmés pour éviter les accidents. Il est aussi possible que les conducteurs abusent du respect rigoureux des distances de sécurité par un véhicule complètement automatisé pour le dépasser et faire réduire sa vitesse. De manière générale, l'introduction progressive de véhicules complètement automatisés va apporter son lot de nouvelles situations de conduite qui risquent d'être surprenantes, voire dangereuses pour les conducteurs n'étant pas habitués à interagir avec cette technologie, qu'ils soient à bord de ce type de voiture ou pour tout autre usager de la route. Dans le domaine de la simulation virtuelle, certains jeux vidéo de conduite dans des mondes ouverts ont fait de cette relation conduite manuelle-conduite complètement automatisée (véhicules gérés par une intelligence artificielle qui respectent un code de la route) un élément à part entière des mécanismes de jeu, communément appelés *gameplay*, car l'interaction avec des objets au comportement prévisible et influençable est ludique. La sensation de contrôle perçue de conducteurs de véhicules manuels sur des voitures complètement automatisées pourrait être une source de comportements dangereux sur la route. De futures études devraient examiner le comportement et les interactions entre les véhicules complètement automatisés et les autres usagers.

Les échantillons de nos trois études sont tous composés d'automobilistes français. Toutefois, il est possible qu'il y ait des différences culturelles plus ou moins importantes quant aux attitudes et comportements liés à la CCA. Par ailleurs, le développement de la conduite complètement automatisée se fait à l'échelle internationale, mais à des stades plus ou moins avancés selon les acteurs. Cette technologie n'est peut-être pas transposable partout, d'un point de vue culturel, législatif et des infrastructures dont la qualité varie beaucoup d'un pays à l'autre. Qui plus est, il est légitime d'avoir des interrogations quant à l'acceptabilité et

l'efficacité d'une voiture complètement automatisée dans différentes régions du monde. Cette technologie sera-t-elle aussi efficace à Saint-Domingue qu'à Helsinki ? A Naples qu'à Miami ? L'introduction de cette nouvelle conduite sur routes publiques est problématique lorsque l'écart entre la conduite prescrite (réglementation et codes de la route) et la conduite réelle (règles informelles, réaction plutôt qu'anticipation) est important. Les pays dans lesquels le code de la route est le mieux respecté seraient alors les plus propices à la conduite complètement automatisée. La période pendant laquelle le parc automobile sera constitué à la fois de véhicules manuels et automatisés risque également de poser problème, les interactions entre les véhicules automatisés et manuels pouvant être surprenantes pour un automobiliste non averti. Afin que cette technologie soit efficace partout, il est probable que les Etats aient à modifier une partie ou l'ensemble de leurs infrastructures routières, et à construire des routes de nouvelle génération (Hautière *et al.*, 2013).

Conclusion générale

La conduite complètement automatisée introduit un nouveau paradigme : l'utilisateur ne conduit plus mais est conduit. Dans les années à venir, si la voiture complètement automatisée est commercialisée et peut circuler sur des routes publiques, le rôle du conducteur changera radicalement. Il n'est pas possible à l'heure actuelle de dire si ce mode de conduite sera obligatoire ou si les conducteurs auront le choix de l'utiliser lorsqu'ils le souhaiteront.

Les compétences de conduite qui seront exigées vont également évoluer et d'autres s'ajouteront à celles déjà requises pour conduire une voiture manuelle. Les recherches réalisées dans la présente thèse ont contribué à définir et mieux comprendre certaines de ces nouvelles compétences, et trouver des leviers pour les améliorer, au moins lors de la première utilisation.

Cette thèse a permis de savoir que les conducteurs d'aujourd'hui souhaiteraient utiliser cette technologie lorsque les trajets sont monotones et éventuellement lorsqu'ils ne seraient plus aptes à conduire. Une méthode simple et rapide d'expliquer et de faire utiliser la conduite complètement automatisée a également été développée et pourrait servir si des formations devenaient nécessaires à l'avenir. Certains paramètres de la reprise de contrôle manuel ont été examinés de manière approfondie afin de mieux comprendre en quoi consiste cette manœuvre : temps de réponse, précision de l'utilisation des pédales, manière de reprendre le contrôle. La posture, les gestes réalisés et la confiance, traduite dans notre troisième étude notamment par le nombre de regards portés sur la route, sont d'autres indicateurs permettant de mieux appréhender la manière dont les conducteurs pourront se comporter à bord de ce type de véhicule.

Cette technologie n'est pas aisément accessible aujourd'hui, hormis pour les départements de recherche et développement des acteurs de cette industrie, ce qui rend difficile les études sur piste avec un prototype instrumenté. En revanche, ne pas avoir de modèle de voiture automatisée encore défini permet à la recherche d'imaginer et de choisir des domaines d'investigations suffisamment flexibles pour être généralisables. En outre, l'avantage de travailler sur simulateur pourrait permettre de tester des situations dangereuses et d'utiliser la technique du Magicien d'Oz sur piste (simuler un système, parfait ou non, en laissant croire au participant qu'il n'est pas contrôlé par un compère), ce qui ne serait pas permis ni possible sur piste ou sur routes publiques. Il reste encore quelques années, voire décennies, avant d'avoir la possibilité d'acheter ce nouveau type de voiture, ce qui laisse un peu de temps pour mener des études longitudinales qui sont, à notre connaissance, inexistantes à ce jour. L'impact de l'utilisation prolongée de la conduite complètement automatisée sur les comportements et attitudes des conducteurs constitue tout un pan d'investigation qui est pour l'instant inexploré. Il pourrait notamment être question de la perte de compétences mobilisées pour la conduite manuelle. Ce type d'étude sera nécessaire afin d'assurer efficacement la transition vers le tout automatisé.

Bibliographie

- Abdel-Khalik, A. R. (1973). The effect of aggregating accounting reports on the quality of the lending decision: An empirical investigation. *Journal of Accounting Research*, Supplement to *Journal of Accounting Research*, 104- 138.
- af Wåhlberg, A. (2006) Speed Choice versus Celeration Behaviour as Traffic Accident Predictor. *Journal of Safety Research*, 37, 43-51.
- Albarracin, D., Johnson, B. T., & Zanna, M. P. (2005). *The handbook of attitudes* (pp. 173–221). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Publishers
- Amalberti, R. (1996). *La conduite des systèmes à risques*. Presses Universitaires de France.
- Amalberti, R. (1998). Les facteurs humains à l'aube de l'an 2000. *Phoebus*, 5, 5-12.
- Amalberti, R., Hoc, J.M. (1994). Diagnostic et prise de décision dans les situations dynamiques. *Psychologie Française*, 39, 177-192.
- Asimov, I. (1986). *Les robots et l'empire*. J'ai lu.
- Baber, C. (1991). Speech Technology in Control Room Systems: a human factors perspective. Ellis Horwood. London.
- Bagozzi, R. P. (2007). The Legacy of the Technology Acceptance Model and a Proposal for a Paradigm Shift. *Journal of the Association of Information Systems*, (4), 244-254
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.
- Bandura, A. (1965). Vicarious processes: A case of no-trial learning. *Advances in experimental social psychology*, 2, 1-55
- Barley, S. (1990). *The Final Call: Air Disasters... When will they ever learn?* Sinclair-Stevenson, London.

- Bastien, J. M. C., Scapin, D. L., & Leulier, C. (1998). Une comparaison des critères ergonomiques et des principes de dialogue ISO 9241-10 dans une tâche d'évaluation d'interface. *Revue d'interaction homme-machine*, 1(1), 33-63.
- Bender, J., De Haan, J., & Bennett, D. (1995). Symbiotic approaches: Content and issues. In J. Bender, J. De Haan, & D. Bennett (Eds.), *The symbiosis of work and technology* (pp. 1-11). London : Taylor & Francis.
- Benedetto-Meyer, M., & Chevallet, R. (2008). Analyser les usages des systèmes d'information et des TIC. Paris : ANACT Éd.
- Billings, C. E. (1997). *Aviation Automation: The Search for a Human-Centered Approach* (Mahwah, NJ: Erlbaum).
- Bjørkly, C.A., Jenssen, G.D., Moen, T., Vaa, T. (2003). Adaptive Cruise Control (ACC) and Driver Performance. Effects on Objective and Subjective Measures. In *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Transport Systems*, 16-20 nov 2003, Madrid, Spain.
- Brandenburg, S., & Skottke, E. M. (2014, October). Switching from manual to automated driving and reverse: Are drivers behaving more risky after highly automated driving? In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on* (pp. 2978-2983). IEEE. doi : 10.1109/ITSC.2014.6958168
- Brangier, E. (2002). L'assistance technique comme forme de symbiose entre l'homme et la technologie. Esquisse d'un modèle de la symbiose homme-technologie- organisation. *Revue d'interaction humain-machine*, 3(2), 19-34.
- Brangier, E. (2003). La notion de « symbiose homme-technologie-organisation ». In N. Delobbe, G. Karnas, & Ch. Vandenberg (Eds.), *Évaluation et développement des compétences*.
- Brangier, E., Dufresne, A., & Hammes-Adelé, S. (2010). Approche symbiotique de la relation humain-technologie: perspectives pour l'ergonomie informatique. *Le travail humain*, 72(4), 333-353.
- Brookhuis, K.A. & de Waard, D. (2006). Consequences of automation for driver behavior and acceptance. *IeA 2006 congress (CD-ROM)*. Amsterdam: Elsevier.

- Broughton, J. & Markey, K. (1996). In-car equipment to help drivers avoid accidents, *Transport Road Research Laboratory, 198*, Crowthorne, Berkshire.
- Browne, M. W., and R. Cudeck. (1993). Alternative ways of assessing model fit. In: *Testing structural equation models*, K. A. Bollen and J. S. Long, eds. Newbury Park, CA: Sage Publications, 136–162.
- Caldwell, J. A., Mallis, M. M., Caldwell, L. J., Paul, M. A., Miller, J. C., & Neri, D. F. (2009). Fatigue countermeasures in aviation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine, 80*, 25-59.
- Carsten, O. M. J., & Fowkes, M. (2000). External Vehicle Speed Control. Executive Summary of Project Results. University of Leeds, UK.
- Casali, J., Wierwille, W.A. (1984). On the measurement of pilot perceptual workload: a comparison of assessment techniques addressing sensitivity and intrusion issues, *Ergonomics, 27*(10), 1033-1050.
- Cestac, J. & Delhomme, P. (Ed) (2012). European road users' risk perception and mobility, The SARTRE 4 survey, Lyon France: Public Imprim.
- Cestac, J., Paran, F., & Delhomme, P. (2011). Young drivers' sensation seeking, subjective norms, and perceived behavioral control and their roles in predicting speeding intention: How risk-taking motivations evolve with gender and driving experience. *Safety Science, 49*(3), 424-432.
- Chewning, E. G., Jr., & Harrell, A. M. (1990). The effect of information load on decision makers' cue utilization levels and decision quality in a financial distress decision task. *Accounting, organizations, and Society, 15*(6), 527-542.
- Cohen, S. (1980). Aftereffects of stress on human performance and social behavior: A review of research and theory. *Psychological Bulletin, 88*(1), 82- 108.
- Cohen, M. S., Parasuraman, R., & Freeman, J. T. (1998). Trust in decision aids: A model and its training implications. In *Proc. Command and Control Research and Technology Symp.*

- Damböck, D., Weißgerber, T., Kienle, M., & Bengler, K. (2012). Evaluation of a Contact Analog Head-Up Display for Highly Automated Driving. In *4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. San Francisco. USA*.
- Davis, F.D., Bagozzi, R.P., & Warshaw P.R. (1989). User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models, *Management Science*, 35, 982-1003.
- Davis, D., Schweizer, N., Parosh, A., Lieberman, D., & Apter, Y. (1990). Measurement of the minimum reaction time for braking vehicles. *Wingate Institute for Physical Education and Sport, Israel*.
- De Groot, S., Ricote, F. C., & De Winter, J. C. F. (2012). The effect of tire grip on learning driving skill and driving style: A driving simulator study. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 15(4), 413-426.
- De Rosnay, J. (2000). L'homme symbiotique. Paris : Le Seuil.
- De Winter, J. C. F., Happee, R., Martens, M. H., & Stanton, N. A. (2014). Effects of adaptive cruise control and highly automated driving on workload and situation awareness: A review of the empirical evidence. *Transportation Research Part F*, 27(Part B), 196–217.
- De Waard, D., van der Hulst, M., Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K. A. (1999). Driver behavior in an emergency situation in the Automated Highway System. *Transportation Human Factors*, 1, 67-82.
- Deary, I. J., & Der, G. (2005). Reaction time, age, and cognitive ability: Longitudinal findings from age 16 to 63 years in representative population samples. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 12(2), 187-215.
- Delhomme, P. (2002, December). Croyances des jeunes automobilistes en matière de vitesse. In *Rapport final. Convention DSCR-INRETS n 00/010/T-étude* (No. 7).
- Delhomme, P., & Meyer, T. (2002, 2ème édition). *Les projets de recherche en psychologie sociale : méthodes et techniques. La recherche en psychologie sociale. Projets, méthode et techniques*. Paris : Armand Colin, Coll. Cursus.

- Delhomme, P., Verliac, J.-F., & Martha, C. (2009). Are drivers' comparative risk judgments about speeding realistic? *Journal of Safety Research*, 40, 333-339.
- Desmond, P.A. & Hancock, P.A. (2001). Active and passive fatigue states, in P.A. Hancock and P.A. Desmond (eds), *Stress, Workload, and Fatigue*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum, 455-65
- Desmond, P. A., Hancock, P. A., & Monette, J. L. (1998). Fatigue and automation-induced impairments in simulated driving performance. *Transportation Research Record*, 1628, 8-14.
- Dingus, T. A., Jahns, S. K., Horowitz, A. D., & Knipling, R. (1998). Human factors design issues for crash avoidance systems. *Human factors in intelligent transportation systems*, 55-93.
- Driverless car market watch (February 2015). Forecasts [Web log post]. Retrieved from http://www.driverless-future.com/?page_id=384
- Dubois M., Bobillier-Chaumon M.É. (2009). « L'acceptabilité des technologies : bilans et nouvelles perspectives », *Le travail humain*, 72, 305-310. doi : 10.3917/th.724.0305.
- Dzindolet, M.T., Peterson, S.A., Pomranky, R.A., Pierce, L.G., & Beck, H.P. (2003). The role of trust in automation reliance. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58, 697-718.
- Eagly, A. H., & Chaiken, S. (1993). *The psychology of attitudes*. Orlando, FL: Harcourt Brace Jovanovich.
- Ebstein, R.P., Novick, O., Umansky, R., Priel, B., Osher, Y., Blaine, D., Bennet, E.R., Nemanov, L., Katz, M., & Belmaker, R.H. (1996). Dopamine D4 receptor (D4DR) exon III polymorphism associated with the human personality trait of novelty seeking. *Nature Genetics*, 12, 78-80.
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems, *Human Factors*, 37, 32-64.
- Endsley, M. R. (1996). Automation and situation awareness. in R. Parasuraman & M. Mouloua (Eds.), *Automation and human performance: theory and applications*, 163-181.

- Endsley, M. R. and Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation, *Human Factors*, 37, 381-394.
- European Commission. (2011). WHITE PAPER: Roadmap to a Single European Transport Area—Towards a competitive and resource efficient transport system. *COM (2011), 144*.
- Ewing, R. (Producer). (1982). *Knight Rider* [Television series]. NBC.
- Eysenck, H.J. (1983). A biometrical-genetical analysis of impulsive and sensation seeking behavior. In M. Zuckerman (Ed.), *Biological Bases of Sensation Seeking, Impulsivity, and Anxiety*, 1-35.
- Fancher, P., Ervin, R., Sayer, J., Hagan, M., Bogard, S., Bareket, Z., Mefford, M., & Haugen, J. (1998). Intelligent cruise control field operation test. Final Report. NHTSA Report No. DOT HS 808 849.
- Federal Aviation Administration (2013a). Operational Use of Flight Path Management Systems. Retrieved from http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/afs/afs400/parc/parc_reco/media/2013/130908_PARC_FltDAWG_Final_Report_Recommendations.pdf
- Federal Aviation Administration (2013b). Safety Alert for Operators No. 13002. Retrieved from http://www.faa.gov/other_visit/aviation_industry/airline_operators/airline_safety/safo/all_safos/media/2013/SAFO13002.pdf
- Fishbein, M., Ajzen, I. (1975). *Belief, attitude, intention and behavior: An introduction to theory of research*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Flemisch, F., Schindler, J., Kelsch, J., Schieben, A., Damböck, D. (2008). Some Bridging Methods towards a Balanced Design of Human-Machine Systems, Applied to Highly Automated Vehicles. Applied Ergonomics International Conference, Las Vegas, USA.
- Foster, P. (2015, May 17). Hacker 'made plane climb' after taking control through in-flight entertainment system. Retrieved from <http://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/northamerica/usa/11611058/Cybersecurity-researcher-made-plane-climb-after-hacking-in-flight-entertainment-system.html>.

- Fuchs, P. (1996). *Les interfaces de la réalité virtuelle*. AJIIMD.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 461-472.
- Funke, G. J., Matthews, G., Warm, J. S., & Emo, A. (2007). Vehicle automation: A remedy for driver stress? *Ergonomics*, 50, 1302-1323.
- Gillet, P., (1991). Construire la formation : outils pour les enseignants et les formateurs, Paris, ESF.
- Gold, C., Damböck, D., Bengler, K. & Lorenz, L. (2013). Partially Automated Driving as a Fallback Level of High Automation. *Proceedings of the 6. Tagung Fahrerassistenzsysteme*. Der Weg zum automatischen Fahren. 28. – 29.11.2013; TÜV SÜD Akademie GmbH, pp.1-5.
- Greenberg, A. (2015, July 21). WIRED. Retrieved 5, from <http://www.wired.com/2015/07/hackers-remotely-kill-jeep-highway/>
- Greenwald, A.G. (1968). Cognitive learning, cognitive response to persuasion, and attitude change. In A.G. Greenwald, T.C. Brock, & T.M. Ostrom (Eds.), *Psychological foundations of attitudes* (pp. 147-170). San Diego, CA: Academic Press.
- Griffith, D. (2006). Neo-symbiosis: A system design philosophy for diversity and enrichment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(12), 1075-1079.
- Groeger, J. A. (2000). *Understanding driving: Applying cognitive psychology to a complex everyday task*, 2. Psychology Press.
- Groeger, J.A., Field, D. & Hammond, S. (1998) *Risk, hazard perception and perceived control. Vol 2: Computerised assessments of drivers' skills: relationships between measures* (Unpublished Project Report No. TT/124/98; DPU 9/31/14). Crowthorne, UK: Transport Research Laboratory in Groeger, J. A. (2000). *Understanding driving: Applying cognitive psychology to a complex everyday task*, 2. Psychology Press.
- Groening, M. (Producer). (1989). *The Simpsons* [Television series]. 20th Century Fox Television.
- Guilbot, M. (2014). Droit et innovations dans l'automobile et la mobilité. *TEC*, (221), 14-24.

- Hatakka, M., Keskinen, E., Gregersen, N. P., Glad, A., & Hernetkoski, K. (2002). From control of the vehicle to personal self-control; broadening the perspectives to driver education. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 5(3), 201-215.
- Harris, W. C., Hancock, P. A., Arthur, E. J., & Caird, J. K. (1995). Performance, workload, and fatigue changes associated with automation. *International Journal of Aviation Psychology*, 5, 169-185.
- Haugh, D., Mourougane, A. & Chatal, O. (2010). The Automobile Industry in and Beyond the Crisis, OECD Economics Department Working Papers, No. 745, OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/5kmmp8wg6cmq-en>
- Hautière, N., De la Roche, C., & Jacquot-Guimbal, H. (2013). La «route» de cinquième génération (R5G): Quelle infrastructure dans vingt ans et quels services en attendre?. *Revue générale des routes et de l'aménagement*, (910).
- Hoc, J.M. (1996). *Supervision et contrôle de processus – la cognition en situation dynamique*. Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble.
- Hoc, J. M. (2000). From human-machine interaction to human-machine cooperation. *Ergonomics*, 43, 833-843.
- Hoc, J.M. (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54, 509-540.
- Hoc, J. M., & Blosseville, J. M. (2003). Cooperation between drivers and in-car automatic driving assistance. In *Proceedings of CSAPC* (Vol. 3, pp. 17-22).
- Hoc, J. M., Mars, F., Milleville-Pennel, I., Jolly, É., Netto, M., & Blosseville, J. M. (2006). *Human-machine cooperation in car driving for lateral safety: delegation and mutual control* (Vol. 69, No. 2, pp. 153-182). Presses Universitaires de France.
- Hoc, J.M., Young, M. S., & Blosseville, J.M. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 135- 60.

- Hoedemaeker, M. (1999) Driving with intelligent vehicles: Driving behaviour with Adaptive Cruise Control and the acceptance by individual drivers (PhD thesis), Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K.A. (1998). BA to driving with an adaptive cruise control (ACC). *Transportation Research Part F, 1*, 95-106.
- Hoff, K. A., & Bashir, M. (2014). Trust in Automation Integrating Empirical Evidence on Factors That Influence Trust. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, doi:0018720814547570
- Hollnagel, E., Paries, J., David, D. W., & Wreathall, J. (2010). Resilience engineering in practice: A guidebook.
- Hu, L.T. & Bentler, P.M. (1999). Cut-off criteria for fit indexes in covariance structure analysis. Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling*, 6, 1-55.
- Inagaki, T. (1999). Situation-adaptive autonomy: Trading control of authority in human-machine systems. *Automation technology and human performance: Current research and trends*, 154-159.
- Inagaki, T. (2006). Design of human-machine interactions in light of domain-dependence of human-centered automation. *Cognition, Technology & Work*, 8(3), 161-167.
- Inagaki, T., & Furukawa, H. (2004, October). Computer simulation for the design of authority in the adaptive cruise control systems under possibility of driver's over-trust in automation. In *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on* (Vol. 4, pp. 3932-3937). IEEE.
- International Transportation Society of America, (2014). [Report]*Accelerating Sustainability: Demonstrating the Benefits of Transportation Technology*.
- Jacoby, J., Speller, D. E., & Kohn, C. A. (1974). Brand choice behavior as a function of information load. *Journal of Marketing Research*, 15,532-544.
- Jacoby, J., Speller, D. E., & Kohn, C. A. (1974b). Brand choice as a function of information load: Replication and extension. *Journal of Consumer Research*, 1,33-42.

- Jamson, A. H., Merat, N., Carsten, O. M., & Lai, F. C. (2013). Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 30, 116-125.
- Johansson, H., Gustafsson, P., Henke, M. & Rosengren, M. (2003) Impact of EcoDriving on emissions. *International Scientific Symposium on Transport and Air Pollution*, France.
- Johns, J. L. (1996). A concept analysis of trust. *Journal of Advanced Nursing*, 24, 76–83.
- Jonah, B. A., Thiessen, R., & Au-Yeung, E. (2001). Sensation seeking, risky driving and behavioral adaptation. *Accident Analysis & Prevention*, 33(5), 679-684.
- Jones, D. G. & Endsley, M. R. (1996). Sources of situation awareness errors in aviation, *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 67, 507- 512.
- Jöreskog, K. G., & Sörbom, D. (1989). LISREL 7: A guide to the program and applications. Chicago: SPSS.
- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, 16(3), 126-131.
- Kaber, D. B. & Riley, J. M. (1999). Adaptive automation of a dynamic control task based on workload assessment through a secondary monitoring task, in M. W. Scerbo and M. Mouloua (eds), *Automation Technology and Human Performance: Current Research and Trends* (Mahwah, NJ: Erlbaum), 129-133.
- Kaufman, A.C. (2014, October 10). Elon Musk : We'll Have Driverless Cars by 2023 [Web log post]. Retrieved from http://www.huffingtonpost.com/2014/10/15/tesla-driverless-cars_n_5990136.html
- Keskinen, E. (1996). Why do young drivers have more accidents? *Junge Fahrer und Fahrerinnen*. Referate der Ersten Interdisziplinären Fachkonferenz 12.-14. Dezember 1994 in Köln. (in English) Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M 52.
- Kopf, M., Nirschl, G. (1997). Driver–vehicle interaction while driving with ACC in borderline situations. *Proceedings of the 4th world congress on intelligent transport systems*. Berlin, Germany.

- Kopf, M., Simon, J. (2001). A Concept for a learn-adaptive advanced driver assistance system. *Proceedings of the conference on cognitive science approaches 2001*, Neubiberg.
- Kramer, U., Rohr, G. (1982). A model of driver behaviour. *Ergonomics* 25, 891-907.
- Kyriakidis, M., Happee, R., & De Winter, J. (2014). Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5,000 respondents. *Available at SSRN* 2506579.
- Lajunen, T., Summala, H. (1995). Driving experience, personality, and skill and safety motive dimensions in drivers' self-assessments. *Personality and Individual Differences*, 3, 307-318.
- Lansdown, T.C. & Fowkes, M. (1998). An Investigation into the Utility of Various Metrics for the Evaluation of Driver Information Systems. In A.G. Gale (Ed.), *Vision in Vehicles VI*. Amsterdam: Elsevier Science, North-Holland.
- Larsson, A. F. L., Kircher, K., & Hultgren, J. A. (2014). Learning from experience: Familiarity with ACC and responding to a cut-in situation in automated driving. *Transportation Research Part F*, 27(Part B), 229–237.
- Laurencin, J.-P., Hoffman, J., Forest, F., & Ruffieux, B. (2004). Retrieved May 19, 2009, from www.mshalpes.prd.fr. Website : www.mshalpes.prd.fr/luce/documents/presentations/Axe4_Acceptabilite_Forest_19052004.ppt.
- Lee, J., & Moray, N. (1992). Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems. *Ergonomics*, 35(10), 1243-1270.
- Lee, J. D., & Moray, N. (1994). Trust, self-confidence, and operator's adaptation to automation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 40, 153-184.
- Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(1), 50-80.
- Lee, J. D., McGehee, D. V., Brown, T. L., & Reyes, M. L. (2002). Collision Warning Timing, Driver Distraction, and Driver Response to Imminent Rear-End Collisions in a High-Fidelity Driving Simulator. *Human Factors*, 44(2), 314–334.

- Lefevre, R., Bordel, S., Guingouain, G., Somat, A., Testé, B., & Pichot, N. (2008). Sentiment de contrôle et acceptabilité sociale a priori des aides à la conduite. *Le travail humain*, 71(2), 97-135.
- Leggett, C., Kleckner, N., Boyle, K., Duffield, J., & Mitchell, R. (2003). Social desirability bias in contingent valuation surveys administered through in-person interviews. *Land Economics*, 79(4), 561–575.
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review*, 95, 492-527.
- Maccoby, E., & Maccoby, N. (1954). The Interview: A Tool of Social Science. *Handbook of Social Psychology*, I, 449-487.
- Malaterre, G. & Saad, F. (1984). Contribution à l'analyse du contrôle de la vitesse par le conducteur : évaluation de deux limiteurs, [Contribution to an analysis of drivers' speed control: assessment of two speed limiters], *Cahier d'études ONSER*, 62, Arcueil : Organisme National de Sécurité Routière.
- Malthotra, N. K, Jain, A. K., & Lagakos, S. W. (1982). The information overload controversy: An alternate viewpoint. *Journal of Marketing*, 46, 27-37.
- Maltz, M., Sun, H., Wu, Q., & Mourant, R. (2004). In-vehicle alerting system for older and younger drivers: Does experience count? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1899(1), 64-70.
- Manstetten, D., Krautter, W., Engeln, A., Zahn, P., Simon, J., Kuhn, F., Frank, P., Junge, M., Lehrach, K. & Buld, S. (2003). Learnability of Driver Assistance Systems – Invent FVM – Driver behavior and Human Machine interaction. *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent transport systems*, 16-20 nov 2003, Spain, 10p.
- May, J. F., & Baldwin, C. L. (2009). Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation Research Part F*, 12, 218-224. doi:10.1016/j.trf.2008.11.005
- Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). An integrative model of organizational trust. *Academy of Management Review*, 20, 709–734.
- McClellan, J.M., (1994). Can you trust your autopilot? *Flying*, 76-83.

- McGehee, D.V., Mazzae, E.N. & Baldwin, G.H.S. (2000). Driver reaction time in crash avoidance research: Validation of a driving simulator study on a test track. *Proceedings of the International Ergonomics Association 2000 Conference*.
- Merat, N., & Lee, J. D. (2012). Preface to the special section on human factors and automation in vehicles designing highly automated vehicles with the driver in mind. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 54(5), 681-686.
- Mercier, J.L., ed. (2003) "3 Questions à Gilles De Robien." *Autoactualité* Feb. 2003: 2. Print.
- Millot, P., & Lemoine, M. P. (1998). An attempt for generic concepts toward human-machine cooperation. *IEEE SMC*, San Diego, CA, October.
- Moessinger, M., Kassaagi, M., Meyer, T., Delhomme, P., Valot, C., & Ragot, I. (2006). Attitude et dynamique de la confiance dans les alertes et les assistances à la conduite (ADAAC). Rapport final de recherche, Prédit 3 GO3 «Psychologie du comportement du conducteur» (PSYCO2, 2004-2005).
- Montag, I., & Comrey, A. L. (1987). Internality and externality as correlates of involvement in fatal driving accidents. *Journal of Applied Psychology*, 72, 339-343.
- Moorman, C., Deshpande, R., & Zaltman, G. (1993). Factors affecting trust in market-research relationships. *Journal of Marketing*, 57(1), 81-101.
- Moray, N. (1986). Monitoring Behavior and in *Supervisory Control, Handbook of Perception and Human Performance: Volume 11: Cognitive Processes and Performance*, K. R. Boff, L. Kaufmann, and J. P. Thomas, eds., John Wiley & Sons, New York.
- Moray, N., Inagaki, T., & Itoh, M. (2000). Adaptive Automation, Trust, and Self-Confidence in Fault Management of Time-Critical Tasks. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, (6)-1, 44-58.
- Muir, B. M. (1994). Trust in automation: Part I. Theoretical issues in the study of trust and human intervention in automated systems. *Ergonomics*, 37(11), 1905-1922.
- Muir, B. M., & Moray, N. (1996). Trust in Automation: Part II. Experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation. *Ergonomics*, 39(3), 429-460.

- National Highway Traffic Safety Administration (2013). *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*. Retrieved from http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf
- Neubauer, C., Matthews, G., & Saxby, D. (2012, September). The effects of cell phone use and automation on driver performance and subjective state in simulated driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 56, No. 1, pp. 1987-1991). Sage Publications.
- Nielsen, J. (1994). Estimating the number of subjects needed for a thinking aloud test. *International Journal of Human-Computer Studies*, 41 (3), 385-397.
- Nilsson, L. (1995). Safety effects of adaptive cruise control in critical traffic situations. In *Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems: Vol. 3* (Tokyo: Vehicle, Road and Traffic Intelligence Society), 1254–1259.
- Nilsson, L. & Nabon, A. (1996). Evaluation of application 3: Intelligent cruise control simulator experiment. VTI särtryck No 266. VTI. Linköping. Sweden.
- Norman, D.A. (1988). *The Psychology of Everyday Things*, Basic Books, New York.
- Norman, D.A. (1990). The “problem” with automation: Inappropriate feedback and interaction, not “over-automation”. In D. E. Broadbent, J. T. Reason & A. Baddeley (Eds.), *Human factors in hazardous situations*. Oxford: Clarendon Press.
- O'Donnell, R.D., Eggemeier, F.T. (1986). Workload assessment methodology, in Boff, K.R., Kaufman, L., Thomas, J.P. (EDS.) *Handbook of perception and human performance*, 2.
- Orr, J. M., Sackett, P. R., & DuBois, C. L. Z. (1991). Outlier detection and treatment in I/O Psychology: A survey of researcher beliefs and an empirical illustration. *Personnel Psychology*, 44, 473-486.
- Özkan, T., Lajunen, T., & Kaistinen, J. (2005). Traffic locus of control, driving skills, and attitudes towards in-vehicle technologies (ISA and ACC). In *Proceedings of the 18th international cooperation on theories and concepts in traffic safety (ICTCT)*, Helsinki, Finland.

- Parasuraman, R. (2000). Designing automation for human use: Empirical studies and quantitative models. *Ergonomics*, 43(7), 931–951.
- Parasuraman, R., & Manzey, D.H. (2010). Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration. *Human Factors*, 52(3), 381-410.
- Parasuraman, R. E., & Mouloua, M. E. (1996). *Automation and human performance: Theory and applications*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Parasuraman, R. & Riley, V. A. (1997). Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse, *Human Factors*, 39(2), 230-253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 30(3), 286-297
- Parasuraman, S., Singh, I. L., Molloy, R., & Parasuraman, R. (1992). Automation-related complacency: A source of vulnerability in contemporary organizations. *IFIP Transactions A—Computer Science and Technology*, 13, 426–432.
- Parent, M., (2012, November 1). The future of automobile Michel Parent at TEDxUniversityofLeeds [Video File]. Retrieved from http://http://www.youtube.com/watch?v=XK0DJ_t5znQ
- Payre, W., Cestac, J., Dang, N.T., Vienne, F., & Delhomme, P. (submitted). Impact of training and in-vehicle task performance on manual control regaining in a fully automated car.
- Payre, W. Cestac, J., & Delhomme, P. (2015, October). Fully automated driving: impact of training on emergency manual control recovery. Presentation. *ITS World Congress Bordeaux 2015*.
- Payre, W., Cestac, J., & Delhomme, P. (2014). Intention to use a fully automated car: Attitudes and *a priori* acceptability. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27(Part B), 252-263. doi: 10.1016/j.trf.2014.04.009
- Payre, W., Cestac, J., & Delhomme, P. (2014, July). Fully automated driving: acceptability and impact of trust and training on manual control recovery. Presentation. *International Congress of Applied Psychology 2014*. Paris, France.
- Payre, W., Cestac, J., & Delhomme, P. (in press,). Fully automated driving: impact of trust and practice on manual control recovery. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*.

- Payre, W., Cestac, J., & Delhomme, P. (manuscript in preparation). Experiencing fully automated driving for the first time in a simulator: a qualitative study.
- Petermann, I., & Kiss, M. (2009). Die Rolle des Fahrers im Spektrum von Automation und Transition. In: *VDI-Berichte 2085*, S. 153–166.
- Piaget, J. (1967). *Logique et connaissance scientifique*. Paris : Gallimard, 927-991
- Plutchik, R. (1980). *Emotion: A psychoevolutionary synthesis*. Harpercollins College Division.
- Reason, J.T (1990). *Human Error*, CUP, Cambridge.
- Reinartz, S. J. & Gruppe, T. R. (1993). Information requirements to support operator-automatic cooperation. Paper presented at *Human Factors in Nuclear Safety Conference*, London.
- Richardson, M., Barber, P., King, P., Hoare, E. & Cooper, D. (1997). Longitudinal driver support systems, *Proceedings of Autotech '97*, London, ImechE, 87- 97.
- Riley, V. (1989). A general model of mixed-initiative human-machine systems, *Proceedings of the 33rd Annual Meeting of the Human Factors Society*, 124-128.
- Robson, C. (1993). *Real World Research: A Resource for Social Scientists and Practitioner-Researchers*. Oxford UK: Blackwell.
- Rogalski, J. (2004). La didactique professionnelle : une alternative aux approches de « cognition située » et « cognitiviste » en psychologie des acquisitions. *Revue électronique Activités*, 2, 103-120.
- Rotter, J. B. (1966). Generalized expectancies for internal versus external control of reinforcement. *Psychological monographs: General and applied*, 80(1), 1-28.
- Rudin-Brown, C. M., & Ian Noy, Y. (2002). Investigation of behavioral adaptation to lane departure warnings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1803(1), 30-37.
- Rudin-Brown, C.M. & Parker, H.A. (2004). Behavioural Adaptation to Lane Departure Warning. *Transportation Research Record*, 1803, 30-37.
- Saad, F., Hjälm Dahl, M., Cañas, J., Alonso, M., Garayo, P., Macchi, L., Nathan, F., Ojeda, L., Papakostopoulos, V., Panou, M., Bekiaris, E. (2004). Literature review of behavioural effects. *Rapport AIDE*.

- Saad, F., Villame, T. (1996). Assessing new driving support systems: contribution of an analysis of drivers' activity in real situations. *Proceedings of Third Annual World Congress on Intelligent Transport System* (CD Rom).
- SAE J3016 (2014). *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*. Society of Automotive Engineers.
- Senders, J.W., Kristofferson, A.B., Levison, W.H., Dietrich, C.W., Ward, J.L. (1967) The attentional demand of automobile driving. In: Victor, T.W., Harbluk, J.L., and Engström, J.A. (2005). Sensitivity of eye-movement measures to in-vehicle task difficulty. *Transportation Research Part F*, 8, 167–190.
- Sahami, S., & Sayed, T. (2010). Insight into Steering adaptation patterns in a driving simulator. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation. Board, No. 2185* (pp. 33–39). Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academics.
- Saxby, D. J., Matthews, G., Warm, J. S., Hitchcock, E. M., & Neubauer, C. (2013). Active and passive fatigue in simulated driving: Discriminating styles of workload regulation and their safety impacts. *Journal of experimental psychology: applied*, 19(4), 287.
- Saxby, D. J., Matthews, G., Hitchcock, E. M., Warm, J. S., Funke, G. J., & Gantzer, T. (2008, September). Effect of active and passive fatigue on performance using a driving simulator. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 52, No. 21, pp. 1751-1755). Sage Publications.
- Schacter, D. L., & Tulving, E. (1994). *Memory systems 1994*. Mit Press.
- Shelley, M. (1818). *Frankenstein or the modern Prometheus*.
- Sheridan, T. B. (1992). *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. MIT press.
- Shields, M. D. (1980). Some effects of information load on search patterns used to analyze performance reports. *Accounting, Organizations, and Society*, 5(4), 429-442.
- Shinar, D., Meir, M., & Ben-Shoham, I. (1998). How automatic is manual gear shifting? *Human Factors*, 40(4), 647-654
- Shinar, D., & Schechtman, E. (2002). Headway Feedback Improves Intervehicular Distance: A Field Study. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 44(3), 474-481
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: is it indeed 90% visual?. *PERCEPTION-LONDON-*, 25, 1081-1090.

- Skottke, E.-M., Debus, G., Wang, L. & Huestegge, L. (2014). Carry-Over Effects of Highly Automated Convoy Driving on Subsequent Manual Driving Performance. *Human Factors*. doi: Published online before print March 4, 2014, doi: 10.1177/0018720814524594
- Snowball, D. (1980). Some effects of accounting expertise and information load: An empirical study. *Accounting, Organizations, and Society*, 5(3), 323-338.
- Sorkin, R.D. & Woods, D. (1985). Systems with human monitors: a signal detection analysis, *Human-Computer Interaction*, 1, 49-75.
- Spence, C., Ho, C. (2009). Crossmodal Information Processing in Driving. In: Castro, C (Ed.), *Human Factors of Visual and Cognitive Performance in Driving*, 187-200.
- Stanton, N.A. & Marsden, P. (1996). From fly-by-wire to drive-by-wire: Safety implications of automation in vehicles. *Safety Science*, 24, 35-49.
- Stanton, N.A. & Salmon, P.M. (2009). Human error taxonomies applied to driving: A generic driver error taxonomy and its implications for intelligent transport systems. *Safety Science*, 47, 227-237.
- Stanton, N.A. & Young, M.S. (1998). Vehicle automation and driving performance, *Ergonomics*, 41-7, 1014-1028. doi.org/10.1080/001401398186568
- Stanton, N.A. & Young, M.S. (2005). Driver behaviour with adaptive cruise control. *Ergonomics*, 48(10), 1294-1313. doi:10.1080/00140130500252990
- Stanton, N.A., Young, M.S. & McCaulder, B. (1997). Drive-by-wire: The case of driver workload and reclaiming control with Adaptive Cruise Control. *Safety Science*, 27, 149-159.
- Stanton, N.A., Young, M.S., Walker, G.H., Turner, H., & Randle, S. (2001). Automating the driver's control tasks. *International Journal Of Cognitive Ergonomics*, 5(3), 221-236. doi:10.1207/S15327566IJCE0503_5.
- Strand, N., Nilsson, J., MariAnne Karlsson, I. C., & Nilsson, L. (2014). Semi-automated versus highly automated driving in critical situations caused by automation failures. *Transportation Research Part F*, 27(Part B), 218–228.
- Taubman, O., Mikulincer, M., & Iram, A. (1996). The cognitive motivational and emotional system of driving. Research report, Department of Casualties and Road Safety of the Israeli Army, Israel.

- Taylor, H. L., Lintern, G., & Koonce, J. M. (1993). Quasi-transfer as a predictor of transfer from simulator to airplane. *The Journal of general psychology*, 120(3), 257-276.
- Terrade, F., Pasquier, H., Reerinck-Boulanger, J., Guingouain, G., Somat, A. (2009). L'acceptabilité sociale: la prise en compte des déterminants sociaux dans l'analyse de l'acceptabilité des systèmes technologiques. *Le Travail Humain*, 72, 383-395.
- The Guardian (2015, August 14). Documents confirm Apple is building self-driving car. Retrieved from <http://www.theguardian.com/technology/2015/aug/14/apple-self-driving-car-project-titan-sooner-than-expected>
- Tricot, A., Plégat-Soutjis, F., Camps, J.-F., Amiel, A., Lutz, G., & Morcillo, A. (2003). Utilité, utilisabilité, acceptabilité : interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. In C. Desmoulins, P. Marquet, & D. Bouhineau (Eds.), *Environnements informatiques pour l'apprentissage humain*, 391-402. Paris : ATIEF/INRP.
- Tucker, P. (2003). The impact of rest breaks upon accident risk, fatigue and performance: A review. *Work & Stress*, 17, 123-137.
- Tversky, B. (2011). Visualizing thought. *Topics in Cognitive Science*, 3(3), 499-535.
- University of Alabama at Birmingham, (2012, June 15). Will your self-driving car be programmed to kill you if it means saving more strangers?. ScienceDaily. Retrieved from www.sciencedaily.com/releases/2015/06/150615124719.htm
- van der Laan, J.D., Heino, A., De Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. *Transportation Research Part C*, 5, 1-10.
- Van Driel, C. J. G., Hoedemaeker, M., & Van Arem, B. (2007). Impacts of a Congestion Assistant on driving behaviour and acceptance using a driving simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 10(2), 139-152.
- Van Elslande, P. (2003). *Erreurs de conduite et besoins d'aide: une approche accidentologique en ergonomie* (Vol. 66, No. 3, pp. 197-224). Presses Universitaires de France.
- Venkatesh, V., & Davis, F. D. (2000). A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies. *Management science*, 46(2), 186-204.

- Venkatesh, V., Morris, M. G., & Ackerman, P. L. (2000). A Longitudinal Field Investigation of Gender Differences in Individual Technology Adoption Decision Making Processes, *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 83(1), 33-60.
- Walker, G. H., Stanton, N. A. & Young, M. S. (2001). Where is computing driving cars? A technology trajectory of vehicle design, *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 13(2), 203-229.
- Ward, N.J., (2000). Task automation and skill development in a simplified driving task. In *Proceedings of the XIVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association and 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, 29 July–4 August 2000, San Diego, CA (Santa Monica, CA: HFES), 3, 302–305.
- Ward, N.J., Humphreys, M., Fairclough, S. (1996). A field study of behavioural adaptation with an autonomous intelligent cruise control system. *Handbook of the International Conference on Traffic and Transport Psychology, 22-25 May, Valencia, Spain*, 15-19.
- Warshawsky-Livne, L., & Shinar, D. (2002). Effects of uncertainty, transmission type, driver age and gender on brake reaction and movement time. *Journal of safety research*, 33(1), 117-128.
- Wei, Z., Macwan, A. P. and Wieringa, P. A. (1998). A quantitative measure for degree of automation and its relation to system performance, *Human Factors*, 40, 277-295.
- Weil-Barais, A. (2005). L'homme cognitif. Paris : PUF.
- Weinberger, M., Winner, H., Bubb, H. (2001). Adaptive cruise control field operational test—the learning phase, *JSAE*, 22, 487-494.
- Wickens, C.D. (1992). Engineering psychology and Human Performance, 2nd ed., Harper Collins, New York.
- Wickens, C. D., Gempler, K., & Morphew, M. E. (2000). Workload and reliability of predictor displays in aircraft traffic avoidance. *Transportation Human Factors*, 2, 99–126.
- Wickens, C. D., & Kessel, C. J. (1981). Failure detection in dynamic systems. In J. Rasmussen & W. B. Rouse (Eds.), *Human detection and diagnosis of system failures* (New York: Plenum Press), 155-169.
- Wickens, C. D., Lee, J., D., Liu, Y. & Gordon-Becker, S. (1998). *An Introduction to Human Factors Engineering*. (New York: Longman).
- Wiener, E. L. (1981). Complacency: Is the term useful for air safety? In *Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar*, 117, Denver: Flight Safety Foundation, Inc.
- Winnykamen, F. (1990). Apprendre en imitant? Paris : PUF.

- Yagil, D. (2001). Reasoned action and irrational motives: A prediction of drivers' intention to violate traffic laws. *Journal of Applied Social Psychology*, 31, 720–740.
- Young, K. L., & Lenné, M. G. (2010). Driver engagement in distracting activities and the strategies used to minimise risk. *Safety Science*, 48(3), 326-332.
- Young, M. S., Brookhuis, K. A., Wickens, C. D., & Hancock, P. A. (2014). State of science: mental workload in ergonomics. *Ergonomics*, (ahead-of-print), 1-17.
- Young, M. S. & Stanton, N. A. (1997). Automotive automation: Investigating the impact on drivers' mental workload. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 1(4), 325-336.
- Young, M. S., & Stanton, N. A. (2001). Mental workload: theory, measurement, and application. *International encyclopedia of ergonomics and human factors*, 1, 507-509.
- Young, M. S. & Stanton, N. A. (2002a). Attention and automation: New perspectives on mental underload and performance. *Theoretical Issues In Ergonomics Science*, 3(2), 178-194. doi:10.1080/14639220210123789
- Young, M. S. & Stanton, N. A. (2002b). Malleable Attentional Resources Theory: A new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors*, 44(3), 365-375.
- Young, M. S. & Stanton, N. A. (2004). Taking the load off: Investigations of how adaptive cruise control affects mental workload. *Ergonomics*, 47(9), 1014-1035. doi: 10.1080/00140130410001686348.
- Young, M. S. & Stanton, N. A. (2007). What's skill got to do with it? Vehicle automation and driver mental workload. *Ergonomics*, 50(8), 1324-1339. doi:10.1080/00140130701318855.
- Zuckerman, M. (1979). *Sensation seeking: Beyond the optimal level of arousal*. Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Zuckerman, M. (1994). *Behavioural Expressions and Biosocial Bases of Sensation Seeking*. Cambridge: University of Cambridge Press.

Annexes

1. Etude 1

1.1. Questionnaire première étude pilote :

Questions posées lors des entretiens semi-directifs :

- Qu'est-ce qui vous donnerait envie d'utiliser une voiture automatisée ?
- Dans quels contextes souhaiteriez-vous utiliser une voiture automatisée ?
 - o Relance : Qu'attendez-vous, en termes d'usage, d'une voiture automatisée ?
- Qu'attendez-vous, en termes de fonctionnalités, d'une voiture automatisée ?
- A bord d'un véhicule automatisé, à la place du conducteur, si vous n'avez aucune commande à toucher alors que le véhicule roule, vous considérez vous comme responsable de la conduite ?
- En plein milieu de bouchons sur une voie, feriez-vous confiance au système de conduite automatisé du véhicule ?
- En plein milieu de bouchons sur une route à plusieurs voies, feriez-vous confiance au système de conduite automatisé du véhicule ?
- Sur autoroute, avec un trafic fluide/modéré/dense, feriez-vous confiance au système de conduite automatisé du véhicule ?
- Désirez-vous garder un œil sur ce qu'il se passe autour de vous lorsque le véhicule conduit tout seul ou souhaitez-vous vous consacrer à une toute autre activité ?
- Monteriez-vous dans une voiture automatisée seul ? A plusieurs ? Avec des proches ? Des enfants ?
- Seriez-vous tenté(e) de boire de l'alcool avant de prendre la place du conducteur d'un véhicule automatisé ? Le feriez-vous ?

- Seriez-vous tenté(e) de prendre des psychotropes avant de prendre la place du conducteur d'un véhicule automatisé ? Le feriez-vous ?
- Au vu des possibilités techniques de la voiture automatisée, préférez-vous rester vigilant en pilotage automatique et ainsi pouvoir anticiper des situations dangereuses ou, souhaitez-vous vaquer à d'autres occupations quitte à devoir réagir précipitamment en cas d'urgence ?
- A bord d'un véhicule dont l'automatisation est totale, et de fait la conduite prise totalement en charge, envisageriez-vous de dormir dans des bouchons, sur autoroute ou en ville ?

1.2. Questionnaire final en ligne

Enquête sur la conduite automatisée et manuelle



IFSTTAR

Merci de participer à cette enquête.

On parle de conduite automatisée lorsque l'automobiliste est dans un véhicule dont les fonctions de pilotage sont prises en charge par un système informatique. Ce système est capable de gérer la vitesse, les distances vous séparant des autres véhicules, la trajectoire, le freinage et les dépassements. Les voitures ayant un système de conduite automatisé sont homologuées afin de pouvoir être utilisées par tous les automobilistes. Toutefois, les automobilistes restent responsables du véhicule et doivent se tenir face au volant avec leur ceinture de sécurité.

Ce questionnaire s'adresse uniquement aux titulaires du permis B.

Pour chaque proposition, entourez une valeur à l'aide de cette échelle qui va de 1 "Pas du tout d'accord" à 7 "Tout à fait d'accord". Les notes 2, 3, 4, 5 et 6 vous serviront à nuancer votre réponse. Vous pouvez revenir à tout moment sur vos réponses.

N'oubliez pas de cliquer sur "Envoyer" en bas de page pour valider votre questionnaire.

Vos réponses sont anonymes selon la loi informatique et libertés, art.78-17, et ne seront utilisées qu'à des fins scientifiques.

Le temps de passation est d'environ 20 minutes.

Questions sur la conduite automatisée

Consigne : Merci de répondre aux questions posées en vous imaginant faire un trajet. Vous êtes à la place de l'automobiliste dans votre voiture personnelle ayant un système de conduite automatisé.

- | | PAS
DU TOUT D'ACCORD | TOUT
A FAIT D'ACCORD |
|--|----------------------------|---|
| 01 Je préférerais reprendre le contrôle manuel du véhicule si le système de conduite automatisé s'engageait dans une situation que je considérerais comme dangereuse | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 02 Je préférerais garder le contrôle manuel de mon véhicule plutôt que de le confier à un système de conduite automatisé en toute occasion | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 03 Le système de conduite automatisé me procurerait de la sécurité comparé à la conduite manuelle | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |

- 04 Si je trouvais une conduite ennuyeuse, je préférerais la déléguer au système de conduite automatisé plutôt que de m'en charger moi-même ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 05 Si j'étais en mode de conduite automatisé, j'aimerais décider du moment où je peux reprendre le contrôle manuel de mon véhicule..... ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 06 Je déléguerais la conduite au système de conduite automatisé si je dépassais le taux légal d'alcoolémie ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 07 Si je déléguais la conduite d'un véhicule à un système de conduite automatisé, je préférerais rester attentif(ve) à ce qui se passe sur la route..... ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 08 Je déléguerais la conduite au système de conduite automatisé si j'étais fatigué(e) ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 09 Je déléguerais la conduite au système de conduite automatisé si j'avais pris des médicaments proscrits avant de conduire..... ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 10 Si j'avais des passager dans mon véhicule automatisé, je préférerais conduire moi-même que de laisser faire le système de conduite automatisé..... ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 11 Je souhaiterais reprendre le contrôle manuel de mon véhicule lorsque le style de conduite automatisé du système ne me convient pas ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 12 Si les conditions climatiques étaient mauvaises (brouillard, éblouissement, pluie, etc.), je déléguerais la conduite au système de conduite automatisé ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7

Section 2

- | | PAS
DU TOUT D'ACCORD | TOUT
A FAIT D'ACCORD |
|--|--|---|
| 13 Je parviens toujours à résoudre les problèmes difficiles si je m'en donne la peine..... | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 14 Si quelqu'un me fait obstacle, je peux trouver un moyen pour obtenir ce que je veux..... | <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 | |
| 15 Il est facile pour moi de maintenir mes intentions et d'accomplir mes objectifs..... | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 16 J'ai confiance en moi pour faire face efficacement aux événements inattendus | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 17 Grâce à mes compétences, je sais gérer des situations inattendues..... | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 18 Je peux résoudre la plupart de mes problèmes si je fais les efforts nécessaires | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 19 Je reste calme lorsque je suis confronté(e) à des difficultés car je peux me reposer sur ma capacité à maîtriser les problèmes..... | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 20 Lorsque je suis confronté(e) à un problème, je peux habituellement trouver plusieurs idées pour le résoudre..... | <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 | |
| 21 Si j'ai un problème, je sais toujours quoi faire..... | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 22 Quoiqu'il arrive, je sais généralement faire face | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |

Section 3

- | | PAS
DU TOUT D'ACCORD | TOUT
A FAIT D'ACCORD |
|--|----------------------------|---|
| 23 Conduire sans avoir d'accident est principalement une question de chance | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 24 Les accidents arrivent principalement en raison de différents événements imprévisibles..... | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 25 L'automobiliste ne peut rien faire de plus que conduire selon le code de la route..... | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 26 Les causes possibles d'accident sont tellement nombreuses que nous ne saurons jamais laquelle est la plus importante | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 27 Les personnes qui conduisent beaucoup sans avoir d'accident sont juste chanceuses ; ce n'est pas parce qu'elles sont plus prudentes | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 28 L'automobiliste prudent peut éviter tout accident..... | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 29 Lorsqu'un automobiliste est impliqué dans un accident, c'est parce qu'il n'a pas conduit comme il le fallait..... | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 30 Lorsqu'un automobiliste est impliqué dans un accident c'est parce qu'il n'a pas prêté attention à sa conduite..... | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |
| 31 Les accidents ne sont que le résultat d'erreurs commises par l'automobiliste | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 |

- 32 Lorsque survient un accident, c'est presque toujours l'automobiliste qui en est la cause ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 33 Il est difficile d'empêcher des accidents dans de mauvaises conditions telles que l'obscurité, la pluie, les routes étroites, les virages, etc. ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 34 La plupart des accidents se produisent à cause du mauvais état des routes, du manque de signalisation appropriée, etc. ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 35 Il est très difficile d'empêcher des accidents impliquant des piétons qui surgissent entre deux voitures en stationnement ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 36 Les accidents impliquant des enfants sont difficiles à empêcher parce qu'ils ne savent pas être prudents ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 37 Il est très difficile d'empêcher des accidents impliquant des personnes âgées car elles entendent et voient mal ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 38 Les accidents se produisent parce que les automobilistes n'ont pas appris à conduire suffisamment prudemment ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 39 Il est toujours possible de prévoir ce qui va se passer sur la route et donc d'empêcher presque tous les accidents ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 40 Les accidents se produisent quand le premier automobiliste ne prend pas en considération toutes les actions possibles du second automobiliste ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 41 Les accidents se produisent parce que l'automobiliste ne fait pas assez d'efforts au volant pour détecter toutes les sources de danger ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 42 La plupart des accidents se produisent en raison du manque de connaissance ou de la paresse de la part de l'automobiliste ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 43 Si vous devez être impliqué(e) dans un accident, il arrivera de toute façon quoi que vous fassiez (difficile d'attribuer une cause si on est déjà impliqué dans un accident) ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 44 La plupart des accidents se produisent à cause d'un second automobiliste qui ne fait pas attention au code de la route même lorsque le premier automobiliste le fait ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 45 L'automobiliste n'a pas assez de contrôle sur ce qui se passe sur la route ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 46 La plupart des accidents se produisent à cause de problèmes mécaniques ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 47 Il y aura toujours des accidents quel que soit le nombre d'automobilistes qui essaient de les empêcher ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 48 Les accidents se produisent lorsque l'automobiliste n'envisage pas tous les comportements possibles des piétons ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 49 La conduite sans accident est le résultat de la capacité de l'automobiliste à faire attention à tout ce qui se passe sur les routes et les trottoirs ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 50 L'automobiliste peut toujours prévoir ce qui va arriver ; c'est pourquoi il n'y a pas de place pour la surprise sur la route ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 51 Il est possible d'éviter les accidents même dans les conditions les plus difficiles telles que les routes étroites, l'obscurité, la pluie, etc ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 52 La prévention des accidents dépend seulement de l'automobiliste et de ses caractéristiques plutôt que de facteurs externes ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7

Section 4

- D'ACCORD PAS DU TOUT D'ACCORD TOUT A FAIT
- 53 Je serais prêt(e) à utiliser une voiture automatisée à la place d'un véhicule classique ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 54 J'aimerais acheter une voiture automatisée ☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5 ☐6 ☐7
- 55 Pour une voiture équipée d'un système de conduite automatisé, je serais prêt(e) à payer _____€ de plus

Pour une voiture équipée d'un système de conduite automatisé, combien seriez-vous prêt(e) à payer en plus par rapport à un véhicule classique ?

Pour moi, la conduite automatisée est :

- | | | | | | | | | |
|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------|
| 56 désagréable | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | agréable |
| 57 inutile | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | utile |
| 58 dangereuse | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 | sécurisante |

Je serais prêt(e) à utiliser le pilotage automatique pour :

- 59 _____ % de mes trajets sur autoroute
- 60 _____ % de mes trajets sur en ville
- 61 _____ % de mes trajets sur route nationale
- 62 _____ % de mes trajets dans les embouteillages
- 63 _____ % de mes créneaux (pour me garer)

Section 5

- | | PAS
DU TOUT D'ACCORD | | | | TOUT
A FAIT D'ACCORD | | |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 64 Vous aimeriez conduire sans avoir prévu ni l'itinéraire, ni l'heure d'arrivée | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |
| 65 Vous avez souvent l'impression de conduire comme un pilote de course | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |
| 66 Vous aimez conduire comme un(e) casse-cou | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |
| 67 Vous aimez conduire sur les routes où il y a beaucoup de virages serrés | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |
| 68 Vous aimeriez apprendre à conduire des voitures qui peuvent dépasser les 300 km/h | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |
| 69 Vous manquez de patience avec les gens qui conduisent d'une façon imprévisible et ennuyeuse | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |
| 70 Vous pensez que conduire très vite dans une grande descente vous amuserait beaucoup | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |
| 71 J'aimerais explorer des endroits étranges | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |
| 72 J'aime faire des choses effrayantes | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |
| 73 Les expériences nouvelles et excitantes me plaisent, même si je dois enfreindre les règles | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |
| 74 Je préfère des ami(e)s qui sont délirant(e)s et imprévisibles | <input type="checkbox"/> 1 | <input type="checkbox"/> 2 | <input type="checkbox"/> 3 | <input type="checkbox"/> 4 | <input type="checkbox"/> 5 | <input type="checkbox"/> 6 | <input type="checkbox"/> 7 |

Fiche signalétique

RS1- Combien de kilomètres avez-vous parcouru au volant d'une voiture la semaine dernière de lundi à dimanche ?

RS3- En quelle année avez-vous obtenu votre permis B ?

RS6- Quel(s) permis possédez-vous ?

- Permis auto (B)..... ☐1
- Permis transport de marchandises (C) ☐2
- Permis moto (A1 ou A) ☐3
- Permis de transport en commun (D) ☐4
- Brevet de sécurité routière..... ☐5

RS2- Vous êtes un(e) ?

- Homme ☐1
- Femme..... ☐2

RS5- Quel est votre âge ?

RS4- Quel type de véhicule utilisez-vous (plusieurs réponses possibles)?

- Petite citadine (C1, Twingo, Clio...)..... ☐1
- Ludospace et monospace ☐2
- Moyenne et grande voiture..... ☐3
- Véhicule de type 4x4 ☐4
- Break..... ☐5
- Véhicule utilitaire ☐6
- Autre, précisez ☐7

RS8- Quelle catégorie professionnelle vous correspond le mieux ?

- Agriculteur exploitant, artisan, commerçant ☐1
- Chef d'entreprise, profession libérale et cadres supérieurs..... ☐2
- Profession intermédiaire (technicien, instituteur, contremaître etc)..... ☐3
- Employé(e)..... ☐4
- Ouvrier qualifié (industriel, artisanal, chauffeur etc) ☐5
- Ouvrier non qualifié (industriel, artisanal) ☐6
- Ouvrier agricole ☐7
- Sans emploi actuellement ☐8
- Élève, étudiant(e) ☐9
- Retraité(e) ☐10

RS11- Dans quelle tranche de revenu annuel se situe votre foyer ?

- Moins de 15 000 euros..... ☐1
- entre 15 000 et moins de 25 000 euros... ☐2
- entre 25 000 et moins de 35 000 euros.. ☐3
- entre 35 000 et moins de 45 000 euros... ☐4
- 45 000 euros et plus..... ☐5
- Ne se prononce pas..... ☐6

RS7- Si vous deviez apprendre à conduire une voiture automatisée, combien d'heures pensez-vous qu'il vous faudrait ?

RS9- Quel est votre diplôme le plus élevé ?

- Aucun ☐1
- CEP ☐2
- BEPC ☐3
- CAP ou BEP..... ☐4
- BAC, brevet professionnel..... ☐5
- Diplôme universitaire de 1er cycle .. ☐6
- Diplôme universitaire de 2^{ème} ou 3^{ème} cycle ☐7

RS10- Pour une semaine, quels sont vos principaux motifs de déplacement en voiture (plusieurs réponses possibles) ?

- Trajet domicile/travail ou études..... ☐1
- Déplacement professionnel..... ☐2
- Conduire/rechercher le(s) enfant(s). ☐3
- Courses, shopping ☐4
- Sorties, loisirs ☐5
- Autre, précisez ☐6

Merci pour votre participation

2. Etude 2

2.1. Exemple d'entretien post-expérience

E : j'aimerais savoir quelles ont été vos impressions sur la conduite automatisée ?

I : j'ai été surpris parce que c'est très fiable en fait, ça réagit comme je l'attendais surtout pour les dépassements où je pensais que ça allait peut-être un peu clocher et au final non, les déplacements étaient bien faits, il ne se rapprochait pas du véhicule et l'anticipait bien. Juste, il n'y avait pas les clignotants mais ça c'était le logiciel. Il y a juste une fois où il ne s'est pas rabattu tout de suite mais sinon j'ai vraiment trouvé que le simulateur était bien. Il y a eu un problème un moment avec un conducteur qui a déboîté de manière un peu imprévisible mais bon, même s'il n'y avait pas eu de simulateur, les comportements des usagers autour sont les mêmes. Sinon ça allait, pas de souci.

E : donc vous estimez que c'est un système fiable et performant ?

I : oui, mis à part la petite panne un moment, d'ailleurs je trouve ça inadmissible. J'aurais bien envoyé une petite lettre au constructeur. En plus c'était en plein virage donc c'était moyen mais on peut reprendre le contrôle assez bien donc ça va.

E : et justement qu'est-ce que vous avez pu ressentir au cours des situations un peu particulières ? Est-ce que globalement vous êtes senti à l'aise sur le trajet ?

I : oui oui.

E : sur la totalité du trajet ?

I : oui, juste moi j'aime bien mais c'est pas ma manière de conduire. Par exemple en ligne droite on doit être à 130 donc ça va et il n'y a pas d'obstacle mais lorsqu'on est en dans les virages moi je sais que j'aime bien adapter ma vitesse et donc parfois comme le simulateur va

à 130 tout le temps je me disais : qu'est-ce qui se passerait si le virage était un peu trop serré ? Au final ça va, il n'y avait pas de souci mais peut-être qu'un jour il y aura un virage peut-être un peu trop serré pour lequel il faudrait peut-être être en dessous de 130, je ne sais pas trop. Donc il y a juste ça. Donc globalement au début on prend en main le logiciel, enfin le simulateur, et on apprend à le connaître et voir si il est fiable mais je pense qu'à la longue il n'y a pas de souci ça pourrait ne pas poser de pépin mais il y a juste une petite période de doute de temps en temps mais sinon ça va.

E : et dans les situations que vous venez d'évoquer ou bien dans d'autres situations, est-ce qu'il vous est arrivé de vous sentir dérouter ?

I : non ça allait car l'autre a déboîté très vite mais il a pris une bonne accélération donc au final il ne fallait pas piler. J'étais un peu en colère contre l'automobiliste mais c'est tout et c'est pareil dans la vie de tous les jours il y a des gens qui se comportent un peu bizarrement. Mais juste je ne sais pas comment au niveau du logiciel, au niveau des capteurs est-ce qu'on peut anticiper ce comportement. Donc c'est vrai que ça pourrait être une situation dangereuse. Il n'y avait personne derrière moi quand j'ai doublé, personne ne me suivait mais souvent en autoroute il y a des voitures qui vont vite et qui nous collent derrière si il y a eu une voiture qui déboîte est-ce que le logiciel va le voir ? Je ne sais pas moi s'il calcule en fonction des accélérations des véhicules ou juste la distance et il va piler ou alors est-ce qu'il ne pilera pas parce que justement il sait qu'il ne faut pas piler car l'autre véhicule va accélérer. Est-ce que ça le logiciel le prend en compte ? Je ne sais pas comment est-ce qu'il se comporterait. Je serais curieux de voir si on a une voiture derrière qui nous colle et qui va vite et qu'une autre voiture déboîte comme ça devant nous. Dans ce cas-là il ne faudrait pas freiner sinon on risquerait de se prendre la voiture de derrière. Eh bien dans ce cas je ne sais pas du tout s'il pourrait le prendre en compte et comment il réagirait.

E : vous avez donc un doute sur le fait qu'il puisse prendre en compte plusieurs éléments ?

I : oui voilà. Là il y a eu des situations relativement simples mais j'aurais été curieux de voir sur une autoroute un peu chargée où les gens roulent vite parce que là ça va, tout le monde roulait à 130 mais dans la vraie vie il y en a qui roulent à 150, il y a des poids-lourds qui nous collent ou ce genre de choses voilà.

E : et par rapport au signalement de la panne est-ce qu'il y a eu une petite appréhension ?

I : non mais juste je ne m'y suis pas attendu donc c'est vrai qu'il y a trois signales, quatre signales sonores et je n'ai pas réagi. A ce moment-là je n'ai pas compris tout de suite que c'était parce que je n'ai pas fait gaffe mais apparemment dans la phase de prise en main du logiciel j'ai pas tilté, c'est que quand il y a eu un signal sonore qui a dit « panne du système » que j'ai fait « merde » et que j'ai repris le contrôle. Effectivement j'ai été surpris parce que c'était en plein virage à 130 mais bon voilà j'ai juste été un peu surpris, pas trop de peur ni de stress mais juste surpris. Voilà pour un système comme ça pour moi ça doit être très fiable, ça veut dire qu'il faut vraiment être attentif tout le temps. Si on est un peu fatigué on peut utiliser le système, ça peut être intéressant. Pareil, si on veut discuter un peu avec sa compagne quoi ou éventuellement envoyer un texto et bien en fait il faut continuer à faire gaffe. Il faut faire attention à la fiabilité, j'ai été surpris.

E : est-ce que vous pourriez me lister les avantages que vous attribuez à la conduite automatisée ?

I : alors ce que j'ai bien aimé c'est que moi je n'ai pas de régulateur de vitesse sur mon véhicule donc c'est vrai qu'on fait très souvent attention au compteur puisqu'on a peur des radars, des flics et machins donc on regarde très souvent son compteur donc c'est vrai qu'on peut être moins attentif à la conduite. Et aussi un peu lié à ça, sur des phases de ligne droite qui sont peut-être un peu ennuyeuses ou quoi, c'est vrai que ça rend la conduite plus agréable

dans le sens où on peut regarder éventuellement le paysage. C'est vrai que moi j'aime bien quand je conduis bah voilà je regarde la campagne, ce genre de choses j'aime bien donc c'est vrai qu'on peut se le permettre tout le temps si la situation n'est pas dangereuse de regarder à droite à gauche donc ça c'est bien. Ça rend la conduite différente et agréable.

E : à l'inverse est ce qu'il y aurait des inconvénients ?

I : les inconvénients eh bien... Des inconvénients... Non bah ce serait juste vraiment une conduite si l'autoroute est vraiment chargée, enfin il faut faire attention, il faut vraiment tout le temps être maître du véhicule donc c'est vrai qu'il faut être attentif tout le temps, il ne faudra pas par exemple si on est en conduite... enfin si l'autoroute est chargée il ne faut pas être en train d'envoyer un texto ou avoir la tête tournée quoi parce que si la voiture déboîte comme ça il faut vraiment être attentif.

E : donc peut-être le risque de se laissé prendre au jeu de trop déléguer au véhicule ?

I : Oui voilà si on délègue trop... Faut pas trop déléguer surtout que si pénalement on est responsable de son véhicule.

E : est-ce que vous pourriez me donner trois termes, trois mots qui caractérisent la conduite automatisée ?

I : je dirais innovant,... Assez plaisant, agréable et un troisième... Un troisième... Je ne trouve pas le terme.

E : alors ce n'est pas grave, évoquez-moi votre idée même si ça n'est pas un mot.

I : j'aimerais bien exprimer peut-être le fait que ça n'est pas fiable à 100 %, je ne dirais pas peu fiable mais le risque zéro n'existe pas. Il faut vraiment rester attentif, il faut quand même être prudent, pas non plus faire confiance à 100 % à ce type de conduite.

E : est-ce que vous vous estimeriez capable dès à présent d'utiliser ce type de système ? Est-ce que vous rentreriez chez vous maintenant avec un système automatisé ?

I : capable oui, maintenant c'est est-ce que le logiciel de navigation est au point.

E : d'accord alors en supposant que je vous proposais un système testé et fiable.

I : oui oui alors il n'y a pas de souci, bien sûr. Justement ce serait amusant de voir si dans la vraie vie il est vraiment performant car là ça reste un simulateur. Je serais curieux de voir si c'est bien fait.

E : d'accord et donc vous ne seriez pas demandeur d'une formation, d'une conduite sur circuit avant ou quelque chose comme ça ?

I : sans l'avoir testé avant ?

E : oui.

I : non quand même, je pense qu'il faut une formation d'une ou deux heures avec un moniteur ou au moins une explication de comment le véhicule peut se comporter dans telle ou telle situation. Ce serait vraiment l'argument commercial, je sais que les Français sont très prudents et un peu réticents aux changements donc il faudrait vraiment... Sans explication, vraiment sans rien, je n'aurais peut-être pas pris volant comme ça. Expliquer comment... je ne sais pas, comment est-ce qu'il calcule les trajectoires et ce que d'autres véhicules ont d'autres capteurs...

E : donc vous auriez besoin d'avoir des connaissances précises sur le système avant de pouvoir vous y fier ?

I : oui pour voir un petit peu comment anticiper, comment est-ce qu'on pourrait réagir. Moi qui suis ingénieur, j'aimerais bien avoir des données techniques, est-ce qu'il calcule les

vecteurs d'accélération des autres véhicules par exemple pour anticiper et avoir des actions sur le frein, l'accélération et le volant ou est ce qu'il calcule les trajectoires et qu'il fait du différentiel, je ne sais pas et j'aimerais bien savoir.

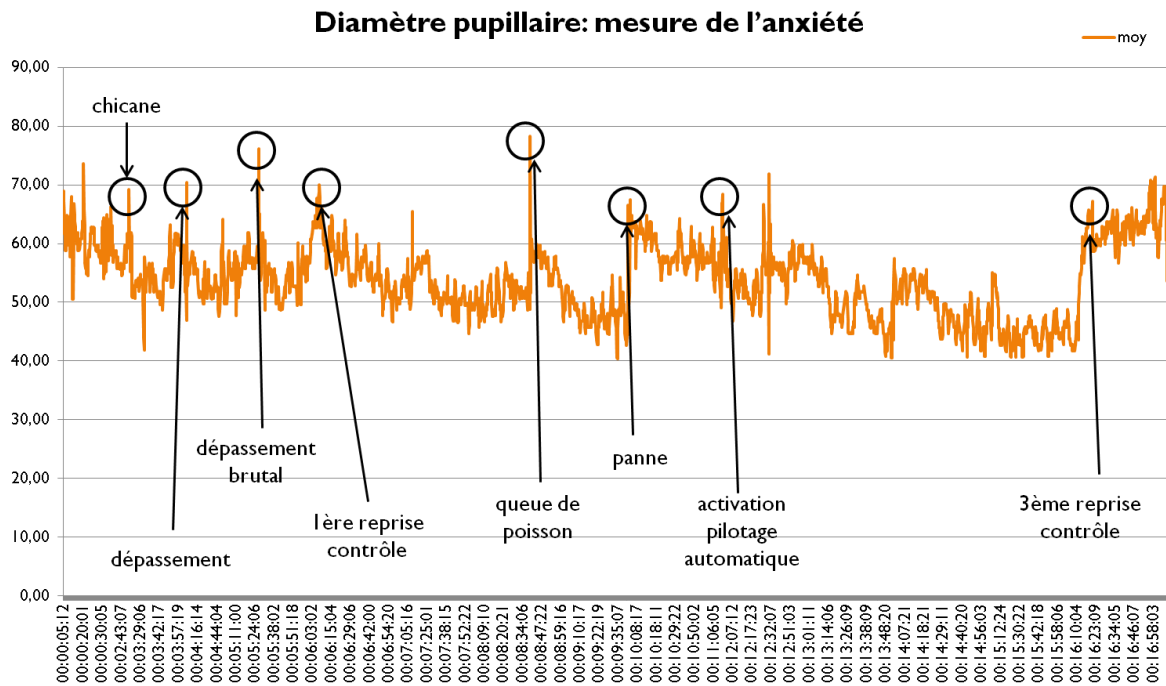
E : et qu'est-ce que vous pensez du futur de l'automatisation des véhicules, est-ce que vous pensez que c'est quelque chose qui va se développer ?

I : alors je pense que ça va se développer oui effectivement mais il faut que ce soit fiable. Si c'est fiable je ne vois quasiment que des avantages donc si vraiment le système est sécurisant et que tous les véhicules quelque part communiquent entre eux, du coup effectivement je pense que ça rendra la conduite fluide et ça éviterait des accidents stupides.

E : et vous pensez que c'est quelque chose qui pourrait avoir lieu plutôt à court, moyens ou longs terme ?

I : à court terme je ne pense pas parce que les gens sont assez réticents aux changements. Mais peut-être que dans 20 ans, c'est relativement court quand même, mais oui pourquoi pas la génération des années 80-90, on est habitué à voir des films etc., donc on sait à peu près ce que c'est. Moi j'avais déjà entendu parler de la voiture Google, après on voit les voitures de Google Map qui prennent des photos pour le guidage des véhicules etc., ça pourrait jouer. Et ça fait une petite dizaine d'années qu'on est habitué aux voitures qui ont des capteurs pour se garer, l'assistance au créneau donc je pense que oui dans 20 ans... Peut-être pas pour la génération de nos parents (j'ai 25 ans).

2.2. Diamètre pupillaire, mesure de l'anxiété: exemple pour un participant



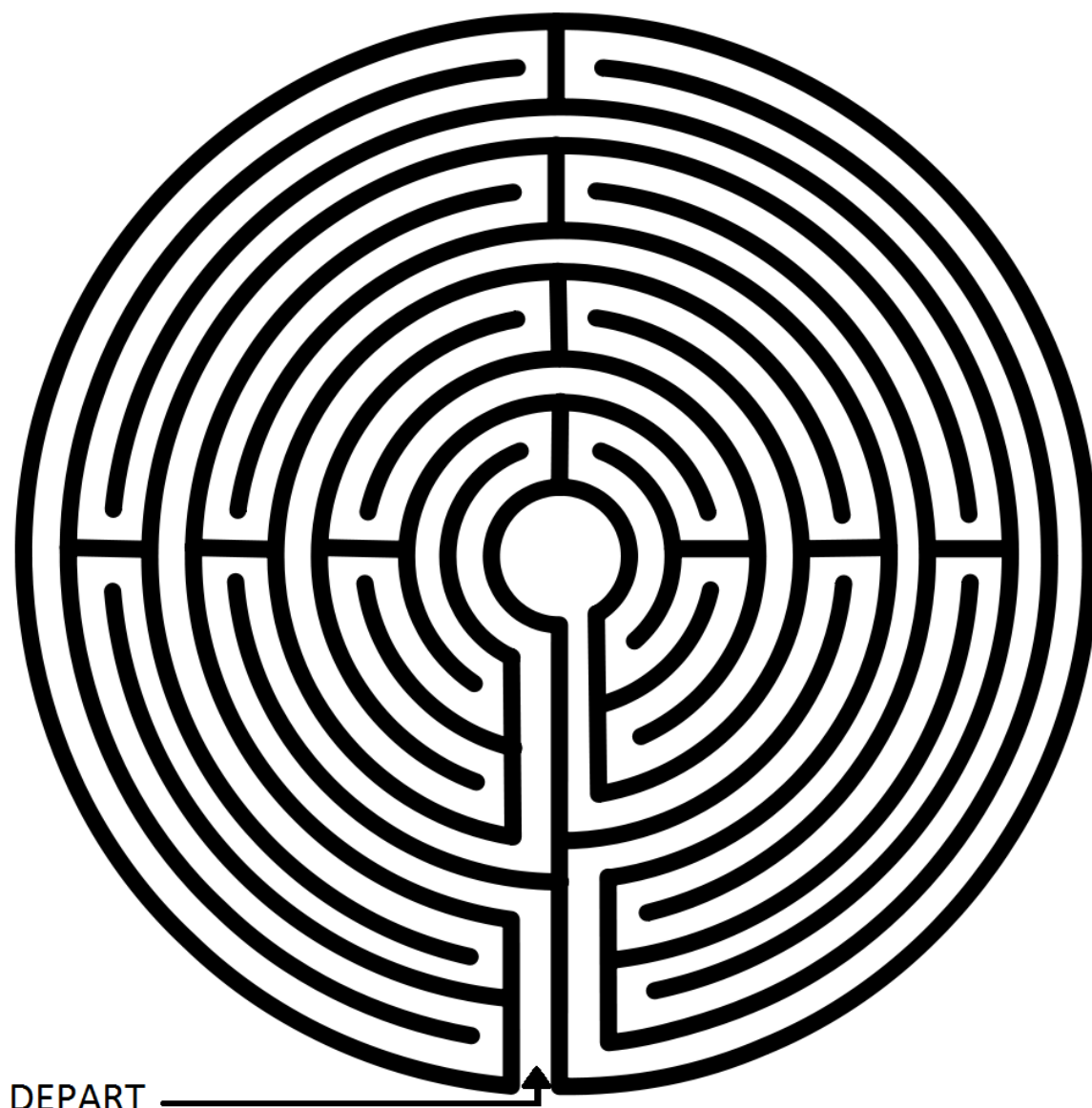
3. Etude 3

3.1. Tâches d'anagrammes et de labyrinthe

Figure 16 : Tâche d'anagrammes, étude 3

CII		SEN		BJO		ZUMEGER	
LMA		LEUIJB		PIB		RADACQUJ	
ABL		MENO		BEINAB		ONIKOM	
OLI		LEEKTC		OGILO		BERMOOSR	
NISOILA		MOTOBIEOL		CROTIBA		CHATTUIRA	
SANPOL		EREBRUE		SENRISH		UTOLELIBE	
TEAH		SRONEEKE		BEKBA		OCFOLN	
FREN		REHKM		ZEMIL		SUBIITC	
REEM		GRURME		CNAB		MAELIF	
UELO		CALI		EMLA		TRIOUVE	
UL		DEO		EMI		HUPAAEC	
TOMN		PAIKO		LAROM		RISOED	
EIBA		XUJE		OBIRUCA		TENDROO	
EIBO		XNYL		IENOGIIMN		LAMNEEG	
RENCAL		QAREUMEUA		NIKBI		UXEEHVC	
AFAIM		IDN		MAAL		LIMAADE	
DILA		IGONDI		NINA		QRASEULEVNAAC	
CEHUMO		MTA		ITL		CMDEEEIN	
DEUNO		BOLE		MOORANRC		PALHEENT	
MIEM		GENSLIMM		HEGANK		<p>Une anagramme est un mot dont les lettres ont été mélangées, il faut les remettre dans le bon ordre pour trouver le mot d'origine. Exemple: A_P_P_A, dans le bon ordre donne PAPA. Résolvez-en le plus possible.</p>	
MESIAB		VUATUOLEE		TOOM			
FAITGLELI		EUTALI		TALI			
JACUOA		TEIMI		TAUGON			
TAJOB		NLEI		LELAM			
TLO		OMU		CAARONI			
ULLEBILLE		MEENLETLAUMN		AKKI			
EMME		PELODISOKELA		SOONDOORBACHUN			
MORLAN		RELME		SOTHIPEELSHEMP			
SACIN		LOSUBA		QEUTHECINMONEM			
GAAMM		TNLE		ATHC			
BBLEU		SPORTJUCAUS		ILUTO			
EL		TLAM		TJOEB			
JISDA		TABON		URBUAE			

Figure 17 : Tâche du labyrinthe, étude 3



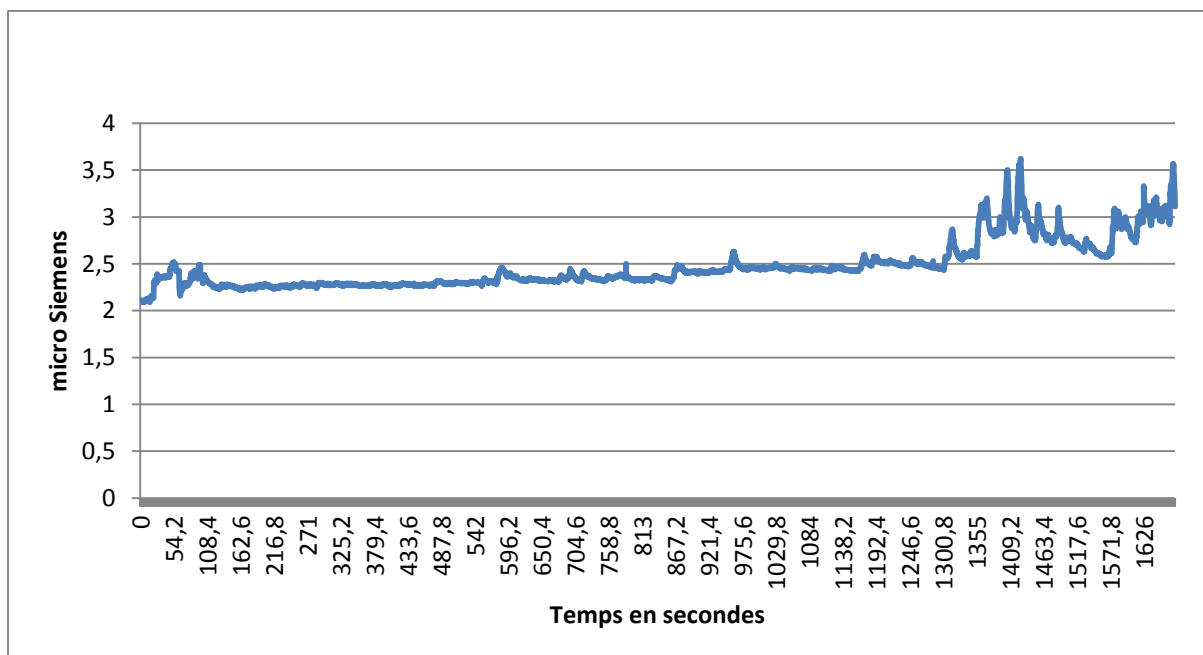
3.1. Exemple de la grille d'analyse pour la tâche de listage d'idées

sujet	confiance dans le système				Vigilance	Monotonie	Pensées personnelles	émotions	reprise de contrôle	Performance Conduite automatisée	Rôle à tenir	Opinion/pensées sur la conduite auto
	confiance	méfiance	de + en +	de - en -								
1							A l'évolution de la technologie, à mon programme de la journée, à des					
2	J'avais confiance à la conduite automatisée,				je regardais les voitures arrivant de derrière, prêtes à me doubler, celles présentes devant moi et vérifiais le bon fonctionnement de l'automatisme.				Lorsque celui-ci est devenu défaillant, j'ai repris le volant sans crainte.			

3.2. Exemple de données oculométriques

	Groupe	sujet	nb blink [10mn]	nb event tot [10mn]	%blink [10mn]
1	B	0938B068	16889	31338	53,89%
2	A	0940A092	4759	30444	16%
3	B	0940B066	15025	30889	48,64%
4	B	0940B121	30342	31290	96,97%
5	B	0942B096	30292	31057	97,54%
6	B	0944B117	27033	31152	86,78%
7	D	0946D077	26322	31228	84,29%
8	B	0950B036	29708	31023	95,76%
9	B	0950B109	30112	31107	96,80%
10	B	0953B014	23935	31517	75,94%
11	B	0958B098	30965	31043	99,75%
12	D	0959D106	29580	31043	95,29%
13	D	1002D029	26366	31173	84,58%
14	D	1004D088	10073	30989	32,51%
15	D	1006D081	30202	31102	97,11%
16	D	1009D031	0	0	#DIV/0!
17	D	1015D062	30848	31171	98,96%
18	B	1025B040	0	0	#DIV/0!
19	B	1132B037	30683	30727	99,86%
20	B	1138B052	0	0	#DIV/0!

3.3. Exemple de données de réponse électrodermale



4. Article de l'étude 1

Intention to use a fully automated car: Attitudes and *a priori* acceptability.

William PAYRE^{a,b}, Julien CESTAC^b and Patricia DELHOMME^b

a VeDeCom Institute

77 rue des chantiers, 78000 Versailles, France

b French Institute of Science and Technology for Transportation, Development, and Networks
(IFSTTAR) France

Department of Planning, Mobilities, and Environment

Laboratory of Mobility and Behaviour Psychology

Correspondence should be addressed to:

William Payre

IFSTTAR

Planning Mobilities Environment Department

Laboratory of Mobility and Behaviour Psychology

25, allée des Marronniers – Satory, 78000 Versailles, France

Phone: + 33 1 30 84 39 55

E-mail: william.payre@ifsttar.fr

Abstract

If previous research studied acceptability of partially or highly automated driving, few of them focused on fully automated driving (FAD), including the ability to master longitudinal control, lateral control and maneuvers. The present study analyzes *a priori* acceptability, attitudes, personality traits and intention to use a fully automated vehicle.

421 French drivers (153 males, $M = 40.2$ years, age range 19-73) answered an online questionnaire.

68.1% of the sample *a priori* accepted FAD. Predictors of intention to use a fully automated car ($R^2 = .671$) were mainly attitudes, contextual acceptability and interest in impaired driving (i.e. the two components of FAD acceptability), followed by driving related sensation seeking, finally gender.

FAD preferred use cases were on highways, in traffic congestion and for automatic parking. Furthermore, some drivers reported interest in impaired driving misuses, despite awareness of their responsibility for both the vehicle and the driving. These results are discussed regarding previous knowledge about acceptability of advanced driving assistance systems and consequences for the use of fully automated cars.

Keywords: fully automated driving; *a priori* acceptability; attitudes; intention.

1.Introduction

1.1.Partially and fully automated driving

Automated driving aims specifically at increasing road safety, reducing traffic congestion, gas emissions and fuel consumption (European Commission, 2011). Thus research concerning civil vehicle automation is crucial. It started in Europe in the late 80's with the European EUREKA Prometheus project which contributed to the conception of the first driverless cars. Since then, many automated prototypes had been constructed and had driven efficiently on different kind of roads in a highly automated mode i.e. mastering both longitudinal and lateral control with few supervisor interventions. For example, the Defense Advance Research Projects Agency (DARPA, 2005) consisted of a 132 miles race in the desert completed by autonomous cars. The Citymobil research, development and demonstration project aimed at integrating automated transport systems in the urban environment (van Dijke & van Schijndel, 2012). Interest in automated driving still grows, as shown by the 9th ITS European Congress (2013) which organized a special interest session dealing with highly automated vehicles, highway trucks and cars platooning, as well as automated urban transportation.

A distinction must be made between the different levels of automation in driving. Regarding partially automated cars, the terminology is varied: automated driving, partially automated driving and highly automated driving (e.g. Jamson, Merat, Carsten & Lai, 2013). Concerning public policies, the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) provided a framework describing five different levels of driving automation (NHTSA, 2013), ranging from 0 (i.e. No-Automation) to 4 (i.e. Full Self-driving Automation). Fully automated driving (FAD) refers to a vehicle able to drive autonomously without any intervention from the driver, or anyone else in the vehicle, as soon as the fully automated mode is activated (e.g. NHTSA's levels 3 and 4). In a fully automated car, longitudinal control (i.e. headway

between vehicles and speed), lateral control (i.e. position in the lane) and maneuvers (such as overtaking and braking) are handled by the system, not by the driver. One of the most famous FAD project concerns Google's self-driving car, considered level 3 – limited self-driving automation by the NHTSA. This car is able to drive autonomously in fully automated mode in Nevada and California since 2011 (Guizo, 2011), albeit the presence of an engineer is required by law at the driver's seat. Renault announced in 2013 that they would commercialize before 2020 a car with a driving delegation device efficient up to 30km/h (Bouteiller, 2013). Concerning medium speed automation, Audi presented during the International CES 2014 in Las Vegas a prototype of the *Piloted Driving* system, which allowed drivers to use this system in heavy traffic, up to 40 mph (64 km/h). This device would be available by 2016.

Nowadays, drivers have the opportunity to buy new cars with different automated driving features, such as Adaptive Cruise Control (ACC, see Saad, Hjalmdahl, Cañas, Alonso, Garayo, Macchi *et al.*, 2004 for a review on the device), Lane Keeping System (LKS), or even Stop and Go device which matches the speed of the car in front in low speed traffic and can also stop and restart the vehicle by itself. These devices make the driving partially automated. Indeed, the driver is assisted, and sometimes substituted, by an electronic system to perform some of the driving tasks, such as mastering longitudinal and lateral control (ACC, LKS), threshold and cadence braking (ABS), or even automatic braking while skidding (ESC).

Since fully automated cars are not commercialized yet, it is important to examine acceptability, attitudes and drivers' intentions toward FAD. Regarding these topics, the highest levels of driving automation have not been entirely addressed yet. Hence, theory about intention, behavior and technology acceptability will be introduced, as well as previous research concerning partially automated driving that focused on attitudes, acceptability and

behavioral adaptation. Afterward, the results of the empirical study on the intention to use FAD will be presented.

1.2.A priori acceptability, attitudes and intention to use automated driving

A priori acceptability of a technology can be defined as the evaluation of that technology before having any interaction with it. Technology acceptability deals specifically with perceived usefulness and perceived ease of use (Davis, 1989). Technology *a priori* acceptability should be addressed considering the evaluation of the technology itself and the methodology used to evaluate it (Bagozzi, 1981), as well as its potential uses, which is possible (Laurencin, Hoffman, Forest & Ruffieux, 2004; Terrade, Pasquier, Reerinck-Boulanger, Guingouain, & Somat, 2009).

The Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, Bagozzi, & Warshaw, 1989) adds more precision on the way to evaluate a technology. It postulates on the one hand that intentions to use a technology have an incidence on usage behavior, and on the other hand that perceived ease of use and perceived usefulness determine intention to use. Moreover, behavioral intention can be predicted by attitudes (Albarracin, Johnson, & Zanna, 2005; Fishbein & Ajzen, 1975). Attitudes can be defined as *a psychological tendency that is expressed by evaluating a particular entity with some degree of favor or disfavor* (Eagly & Chaiken, 1993, p. 1). It seems reasonable thus to expect that the intention to use a technology/object could be predicted to some extent by users' attitudes and by its *a priori* acceptability, especially because *a priori* acceptability and attitudes are correlated (Parasuraman, Singh, Molloy, & Parasuraman, 1992).

Attitudes are globally positive toward simulated partially automated driving systems (Nilsson, 1995; Stanton, Young, & McCaulder, 1997; de Waard, van der Hulst, Hoedemaeker, & Brookhuis, 1999). In addition, delegating driving can be appealing when a journey is considered monotonous or unpleasant (Fancher, Ervin, Sayer, Hagan, Bogard, Bareket *et al.*,

1998), confirming that use cases have a major role in Advanced Driving Assistance Systems (ADAS) acceptability. Indeed, traffic congestion and highways seemed to be situations in which using partially automated driving would have benefits on driving comfort, according to studies on ACC (Saad & Villame, 1996). Finally, men are more inclined than women to use technology (Venkatesh, Morris, & Ackerman, 2000). Nonetheless, the authors did not report the effect of age on technology acceptability in this study.

Furthermore, ADAS that decrease control on driving (e.g. decision making) may have less chance to be accepted by drivers (van der Laan, Heino, & de Waard, 1997). Indeed, although ADAS are evaluated positively as useful and safe, drivers have a negative judgment on people choosing to use such driving assistance systems because they think that they are considered drivers with poor skills (Lefevre, Bordel, & Guingouain, 2008). This contrast might be in conflict with the development of automated driving systems because in the partially automated mode, the driver does not directly control the classic driving tasks such as navigation, control or hazard identification (Stanton, Young, Walker, Turner, & Randle, 2001). This could lead to a rejection of driving assistance technology, and stresses the paradox between positive subjective evaluation of a technology and the weak intention to use it. However, the fully automated level of driving is able to substitute the driving system for the driver; he/she might then think he/she is not assisted but substituted by the automated driving system. Thus, being substituted might lead to either rejection or approval of the automated driving system, depending on the personality traits of the driver.

1.3. Behavioral adaptation, personality traits and new driving technology

Among studies on behavioral adaptation to ADAS, one of the main findings is that locus of control and sensation seeking are personality traits which could have an influence on driving behavior when using ADAS (Rudin-Brown & Noy, 2002; Rudin-Brown & Parker, 2004; Stanton & Marsden, 1996; Ward, Fairclough, & Humphreys, 1995).

Locus of control is defined as a personality trait that echoes the extent to which a person believes he or she can control events that affect him/her (Rotter, 1966). Someone who believes he/she can control events has an internal locus of control, whereas those who do not believe it are external. Concerning partially automated driving and locus of control, overconfidence is more salient for drivers with an external locus of control than those with an internal locus of control; this result has been observed on a simulator but not on a test-track (Rudin-Brown & Noy, 2002). Yet, locus of control was not affected by simulated partial automation (i.e. ACC, Stanton & Young, 2005), whereas locus of control did increase external drivers' reaction time to ACC failure compared to internals in Rudin-Brown and Parker's experiment on a test-track (2004). It might be easier for external drivers to trust automated driving system, considering they rely less on their own driving skills than internals (Rudin-Brown & Noy, 2002). In order to measure driving locus of control, Montag and Comrey (1987) developed a driving internality-externality scale, with two independent (not bipolar) dimensions. Externals are expected to prefer FAD more than internals.

Sensation seeking is defined as a *trait describing the tendency to seek novel, varied, complex and intense sensations and experiences and the willingness to take risks for the sake of such experience* (Zuckerman, 1994). High sensation seeking is positively correlated with risk taking behavior, including driving (Jonah, Thiessen, & Au-Yeung, 2001; Zuckerman, 1994). The driving-related sensation-seeking scale (DRSS) (Taubman, Mikulincer, & Iram, 1996, adapted by Delhomme, 2002) has also been positively correlated with driving risky

behavior (Cestac, Paran, & Delhomme, 2011; Delhomme, Verlhac, & Martha, 2009; Yagil, 2001). Thus, high sensation seekers are expected to intend to use a fully automated car more than low sensation seekers, in order to experience novelty and adventure. However, delegating driving may lower thrill experience while driving. It has been shown that when using an ACC device, high sensation seekers drive on average faster, with shorter headways between vehicles and make stronger braking (Hoedemaeker & Brookhuis, 1998; Ward et al., 1996). Thus, high sensation seekers might adapt their behavior while being driven by an electronic system in their own car by being less careful.

Behavioral adaptation using ADAS or different levels of automated driving could be explained by the will to maintain a certain level of task difficulty (Fuller, 2005). Indeed, driving task difficulty, defined as *the dynamic interaction between the determinants of task demand and driver capability*, might be challenged when delegated to an electronic system, as it is in FAD. This perceived substitution in driving activity could lead operators to redefine driving activity. As their driving capability is no longer challenged, they could aim at realizing another activity (e.g. reading the newspaper, checking emails on a smartphone, etc.), giving up supervising whether needed or not, or even using FAD while they should not (e.g. while impaired). Giving up supervising or using FAD while impaired could enhance the difficulty of the last driving task left when using FAD: manual control recovery.

1.4.Objectives

Studying specifically FAD was decided because research on behavior toward automated driving had essentially focused on partial automation (Özkan, Lajunen, & Kaistinen, 2005; see Saad *et al.*, 2004; Stanton & Young, 1998, 2005), especially on the ACC and more generally on level 1 and 2 of NHTSA's framework. The objectives of the study are to evaluate if drivers have the intention to use FAD (i.e. NHTSA's level 3 of automation), and if this intention to use FAD can be predicted by a priori acceptability, attitudes, personality traits and behavioral adaptation to automated driving. Considering tools evaluating drivers' attitudes toward this technology do not exist yet, two pilot studies were conducted to explore motivations, attitudes and intentions toward FAD. This iterative process is usual in a poorly explored field and does not need large samples because the pilot studies only aim at increasing the validity of the tool (Delhomme & Meyer, 2002; Robson, 1993).

2.Pilot Studies

The main goal was to ask drivers questions on FAD, according to their driving experience and the knowledge from the literature review.

2.1.First pilot study method

2.1.1.Participants

Five semi-directive interviews were conducted in order to collect information about intention to use and acceptability toward FAD. Participants ranged from expert to neophyte concerning automated driving knowledge. All of them were men.

2.1.2.Procedure

The semi-directive interview framework was based on a state of the art concerning automated driving, automation, and driving habits. Information based on constructors' reports and exhibitions were also gathered.

Participants to this pilot study were interviewed face-to-face. Data collecting took from 30 to 60 min.

2.1.3. Measures

A short description of a fully automated car was given to the participants along with some use cases and examples: *"An automated car is a vehicle which driving functions are handled by an in board computer. It is able to master the speed, headways, braking and maneuvers of the vehicle. It is designed to be used by all kind of drivers"*. They were told that in such a car, they were still responsible for both the driving and the vehicle. This description refers to NHTSA's level 3, limited self-driving automation, as drivers are expected to be available for occasional manual control.

Ten questions were formulated to the participants. Firstly, participants were asked about their interest in a fully automated car. Then, the questions concerned the context in which they would use it, what they would expect from that kind of technology and if they would feel responsible for the car and the driving while cruising in automated mode. Finally, questions about impaired driving and the intention to use FAD were asked.

2.1.4. Results

Interviews gave clues about the favorable conditions that would lead drivers to accept automated driving. The driving environment is a recurring element that appeared in the verbatim, e.g. *I will not use such a device in a city (i.e. built-up areas) because it is too risky, particularly when children cross the streets* (observed five times out of five interviews); *I might use driving automation for a long journey, when driving is not stressful* (observed four times). Questions about impaired driving in a fully automated car were also asked. They dealt with alcohol, drug use, medication that could affect driving abilities and tiredness. Two out of five interviewees declared they would have a temptation to use FAD while being over the alcohol limit, two out of five declared they would use it after taking side-effects medication: *Taking such medication and using fully automated driving would be attractive. I used to have some health problems and I had to take public transportation. The disadvantage is that you are still responsible for the driving.*

2.2. Second pilot study method

Based on the analyze of the interviews from the first pilot study, questions were formulated about intention to use and *a priori* acceptability of FAD, leading to a first questionnaire including 39 items.

2.2.1. Participants

In the second pilot study, 45 participants answered the questionnaire, 52.2% of them were women. Mean age of the sample was 33.6 year-old, min= 19; max= 68. On average, they had held their driving license for 15.4 years, and had driven for 194 km the previous week before filling the pilot questionnaire.

2.2.2. Procedure

Answers were all collected with a paper version of the questionnaire. Participants were not observed while doing it. A short description of a fully automated car (the same as in the first pilot study) was given to them. They were told they would be responsible for both the driving and the vehicle. Approximately 15 min were needed to answer the questionnaire.

2.2.3. Measures

A 7-point Likert scales was used, ranging from 1: *I strongly disagree* to 7: *I strongly agree*. The seven themes of the questionnaire were:

1. The level of automation they wanted to set: e.g. *I would like to choose which devices are automated*, $M= 6.45$, $SD= .59$, min= 5, max= 7;

2. Intention to use FAD depending on the driving environment: e.g. *If driving was boring to me, I would rather delegate it to the automated driving system instead of doing it by myself*, $M= 5.02$, $SD= 1.88$, min= 1, max= 7; *I would rather use the automated driving system on the highway than driving by myself*, $M= 5.31$, $SD= 1.95$, min= 1, max= 7;

3. The situations in which they would prefer to recover control from the automated pilot: e.g. *I would like to recover control from the automated pilot if I did not like the way it drives*, $M= 6.38$, $SD= 1.07$, min= 1, max= 7;

4. Interest in using automated driving while impaired: e.g. *I would delegate the driving to the automated driving system if: I was over the drink driving limit*, $M= 6.11$, $SD= 1.67$, $\min= 1$, $\max= 7$; *I was tired*, $M= 5.38$, $SD= 1.87$, $\min= 1$, $\max= 7$; *I took medication that affected my ability to drive*, $M= 5.42$, $SD= 1.97$, $\min= 1$, $\max= 7$;

5. Intention to use the automated car with other passengers on board: *If I had passengers in my automated car, I would rather drive by myself than delegating to the automated driving system* $M= 4.37$, $SD= 1.65$, $\min= 1$, $\max= 7$;

6. Their estimation in hours on the extra time needed to learn how to drive an automated car: *According to me, how much time would I need to learn how to drive an automated car?* $M= 9.2$, $SD= 9.5$, $\min= 1$, $\max= 50$;

7. The following socio-demographic variables were registered: age, gender, academic degree, profession, how long they had held their driving license and how far they had driven the previous week of the study.

2.2.4. Results

An exploratory factor analysis was led, resulting in extracting eleven factors. An oblimin rotation was applied, and the chosen extraction method was principal component analysis. The first two factors were selected because they explained respectively 25% and 12% of the variance. These two sets of items made sense and were coherent for each factor. Redundant items were excluded as well as items with low factor loadings. Finally, seven items were identified according to their high factor loadings ($>.65$) on their respective dimensions. A second factor analysis, with again a principal component analysis extraction and oblimin rotation, was led on these seven items. Two factors were selected because their eigenvalues were above one. The first dimension (42% of the variance) referred to the contextual acceptability of an automated car system ($\alpha= .83$), (four items):

1. *I would rather keep manual control of my vehicle instead of delegating it to the automated driving system in every occasion, $M= 3.8$, $SD= 2.04$, $\min= 1$, $\max= 7$;*
2. *The automated driving system would provide me safety compared to manual driving, $M= 3.67$, $SD= 1.7$, $\min= 1$, $\max= 7$;*
3. *If driving was boring to me, I would rather delegate it to the automated driving system instead of doing it by myself, $M= 5.02$, $SD= 1.88$, $\min= 1$, $\max= 7$;*
4. *If I had passengers in my automated car, I would rather drive by myself than delegating to the automated driving system, $M= 4.37$, $SD= 1.65$, $\min= 1$, $\max= 7$.*

The second dimension (25% of the variance) referred to the interest in using driving automation while impaired ($\alpha= .72$), (three items):

1. *I would delegate the driving to the automated driving system if I was over the drink driving limit, $M= 6.11$, $SD= 1.67$, $\min= 1$, $\max= 7$;*
2. *I would delegate the driving to the automated driving system if I was tired, $M= 5.38$, $SD= 1.87$, $\min= 1$, $\max= 7$;*
3. *I would delegate the driving to the automated driving system if I took medication that affected my ability to drive, $M= 5.42$, $SD= 1.97$, $\min= 1$, $\max= 7$.*

The sample was small ($N=45$), and the age proportion was unbalanced, $M_{\text{♂}}=30.7$, $M_{\text{♀}}=36.6$, however this analysis was conducted only to select the most relevant items.

3. Main study

3.1. Hypotheses

Results from the two pilot studies and the literature review presented above led to build the questionnaire and to formulate the following hypotheses. The present study aimed at exploring two different issues concerning FAD. The first one was: to what extent would drivers *a priori* accept FAD? If they did, to what extent would they intend to use such a system? The first hypothesis was that drivers would *a priori* accept FAD because of its features (e.g. longitudinal control and lateral control); it was expected that FAD would be considered more useful than manual driving (H1), as shown by Hoedemaeker and Brookhuis (1998) and Hoedemaeker and Kopf (2001), even if the authors used partial automation. Attitudes were also expected to predict the intention to use a fully automated car (H2).

Moreover, the authors hypothesized that personality factors such as sensation seeking and locus of control would be related to the intention to use it. Thus, it is supposed that high sensation seekers would intend to use this technology more than low sensation seekers (H3a) (Rudin-Brown & Parker, 2004) and that drivers with external locus of control would intend to use it more than those with internal locus of control (H3b), as shown by Rudin-Brown and Noy (2002) and Rudin-Brown and Parker (2004). The fourth hypothesis was that the will to use a fully automated car would depend on the driving environment, according to the results of the first pilot study. Drivers were expected to be more interested in FAD on highways, in traffic congestion and when driving is monotonous, than in built-up areas (H4). Furthermore, drivers were expected to be interested in using a fully automated car while impaired, again according to the results of the first pilot study and to task difficulty homeostasis theory (H5). Finally, it was hypothesized that men's attitudes toward FAD would be more positive than women's, and also that they would intend to use it more than women, as shown by Venkatesh *et al.* (2000) (H6).

These hypotheses were tested using an online questionnaire.

3.2.Method

3.2.1.Participants

A sample of 421 drivers (153 males), took part to the study. Among them, 62 participants did not answer entirely the questionnaire. Notwithstanding, they were included in the analysis because they completed entirely one or several sections before quitting. Mean age of the sample was 40.2, $SD= 15.9$, min= 19, max= 82. They reported having their driving license for 20.8 years on average, $SD= 15.8$, min= 0, max= 63, and driving an average of 250km the last week before they filled the questionnaire, $SD= 305.6$, min= 0, max= 2000.

3.2.2.Procedure

The questionnaire was broadcast to mailing lists dealing with ergonomics, psychology, engineering as well as people unfamiliar with driving automation field. Participants were told that the driving license was required to take part in the study. The questionnaire was uploaded on the internet, using an online survey tool.

3.2.3.Measures

The questionnaire was presented as a survey aiming at evaluating behaviors toward driving automation. In the first out of six sections, a short and simple description of a fully automated car was presented, the same as in the pilot study, along with some examples of concrete use cases. Drivers were told to imagine themselves driving such a car in automated mode: *Imagine yourself making a trip. You are the driver in your own car which is equipped with an automated driving system.* They were also told that they were still responsible for the car and for the driving. The questionnaire consisted of the two FAD *a priori* acceptability dimensions extracted from the second pilot study, and an adaptation of Montag and Comrey

driving internality-externality scales. In addition to these scales, participants' intention to use FAD, attitudes toward FAD, driving-related sensation-seeking scale score (DRSS) as well as demographics were measured.

In the second section, features of the fully automated car were described along with use-cases. Participants were informed about the mandatory responsibility for the driving and the vehicle. They were asked if they understood what was FAD and if they had their driving license. If they did, they were able to start the first section of the questionnaire. A Likert scale (1 referring to "I do not agree at all", 7 referring to "I totally agree") was used for the different scales and items presented.

In the third section, 7 questions were presented in a random order to measure *a priori* acceptability. As in the pilot study, the factor analysis revealed two dimensions from this set of questions, composing the FAD acceptability scale: contextual acceptability toward FAD, $\alpha=.72$, and interest in using FAD while impaired, $\alpha=.89$. The internal consistency of the FAD acceptability scale is good, $\alpha=.77$.

The fourth section, contained the driving internality, $\alpha=.87$, $M= 6.4$, $SD= 3.7$ and the driving externality, $\alpha=.75$, $M= 5.8$, $SD= 0.74$, scales adapted from Montag and Comrey (1987). Each scale consisted of 15 items.

In the fifth section, they filled questions about intention to use automated driving, how much they would spend to buy an automated driving device (i.e. open-ended question), what kind of road or traffic environment they would prefer to use the system, and finally their attitudes toward automated driving (e.g. *I consider fully automated driving as unpleasant vs. pleasant, useless vs. useful, dangerous vs. sure*). The three items on attitudes were merged into one dimension, $\alpha=.88$, $M= 4.56$, $SD=1.49$.

In the sixth section, they filled the DRSS, $\alpha=.75$. Confirmatory factor analyses confirmed the unidimensionality of this scale.

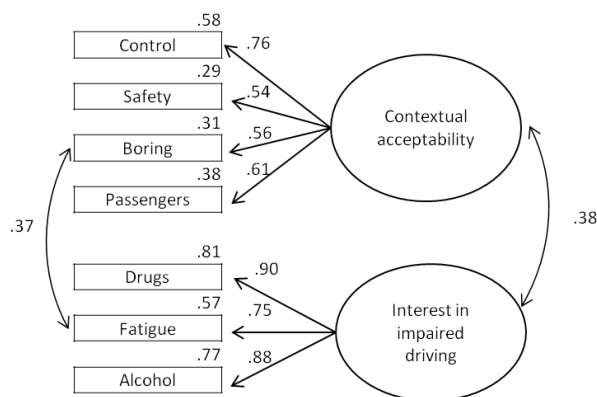
In the last section, they answered socio-demographic questions: gender, age, year of driving license acquirement, kilometers driven last week, and extra-hours estimated to learn automated driving.

3.3 Results

A confirmatory factor analysis was conducted on the FAD acceptability scale, in order to test the two-factor structure found in the pilot study: intention to use FAD while impaired and contextual acceptability. This structure was confirmed, and the model showed acceptable fit ($NFI= 0.96$, $RSMEA= 0.07$, $CFI= 0.97$). Indeed, the NFI specifies a good fit when above 0.95 (Jöreskog and Sörbom, 1989), the value of the RMSEA is acceptable when below 0.08 (Browne and Cudeck, 1989), and a value of $CFI \geq 0.95$ is recognized as indicative of good fit (Hu and Bentler, 1999). The two dimensions were positively correlated $r=.38$ (see Fig. 1).

Figure 1

Fully automated driving acceptability scale



Note: all parameters are significant, $p < .001$

The descriptive analysis of the study's results is presented in the next section. The linear regression analysis aiming at explaining the intention to use FAD will be described afterward.

3.3.1 Descriptive analysis

Overall, 68.1% of the participants scored above 4 (i.e. the median point of the 7-point likert scale) on the FAD acceptability scale. Concerning the two dimensions of this factor, 70.6% of the participants scored above 4 on the interest in using FAD while impaired dimension, and 52% scored above the median on the contextual acceptability dimension. Most of them were interested in using a fully automated car, 52.2% scored above the median of the scale, $M = 4.46$, $SD = 1.84$, $\min = 1$, $\max = 7$; nevertheless, they were not quite ready to buy one yet, $M = 3.54$; $SD = 1.98$, $\min = 1$, $\max = 7$ (see Table 1). Concerning the willingness to pay for a fully automated car, when participants envisaged to buy one (78% of the sample), they were ready to spend on average 1624€, $SD = 2112$, $\min = 0^1$, $\max = 10000$. Attitudes toward FAD were rather positive, $M = 4.56$, $SD = 1.49$, $\min = 1$, $\max = 7$.

Participants estimated they would need almost 7 extra hours on average to learn how to drive a fully automated car, $M = 6.92$, $\min = 0$, $\max = 72$. This is two hours less than what was found in the pilot study. They had held their driving license for more than 20 years on average when they answered the questionnaire in April 2013, $M = 20.9$, $SD = 15.8$, $\min = 0$, $\max = 63$.

Table 1
ANOVA

	$M_{\text{♂}}$	$M_{\text{♀}}$	F	η^2
Intention to use	5.01	4.18	20.6*	.05
Intention to buy	4.03	3.27	14.2*	.03
Willingness-to-pay	1877	1468	n.s.	-
Age	43.75	38.05	12.8*	.03
Interest in impaired driving	5.31	4.92	n.s.	-
Contextual acceptability	4.62	3.97	22.3*	.05
DRSS	3.19	2.63	24.7*	.06
Attitudes	5.04	4.31	24.5*	.06

Note: * $p < .001$, DRSS = Driving Related Sensation Seeking

¹ Paying 0€ to get a FAD system in addition to the price of a regular car could mean that participants considered this device should be included in the basic features as it is, for example, for power-assisted steering.

As expected, there was a significant correlation between contextual acceptability and attitudes, confirming results from previous research (Parasuraman *et al.*, 1992). An effect of gender on the intention to use and to buy an automated car was also observed (see Table 1). Men wanted to use it more than women, and they were more inclined to buy one. Men would also be more interested in using it while impaired. They accepted more FAD than women, and had more positive attitudes toward it. Except for the gender, low correlations were found with the adaptation of Montag and Comrey scales. There were low positive correlations with driving internality and both acceptability and attitudes (see Table 2), $r = .12$. Driving externality was slightly correlated with the DRSS, $r = .13$. High significant correlations between attitudes toward FAD and both intention to use and intention to buy a fully automated car (see Table 2) were found. Finally, a significant correlation between DRSS and interest in using FAD while impaired was found, $r = .1$, $p < .05$.

Table 2
Correlations ($N = 421$)

	<i>M</i>	<i>SD</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Intention to use	4.46	1.84										
2. Intention to buy	3.54	1.98	.79**									
3. Willingness-to-pay	1624	2124	.32**	.39**								
4. Gender	-	-	-.22**	-.18**	-.09							
5. Age	40.23	15.86	.08	.09	-.19**	-.18**						
6. Interest in impaired driving	5.03	2.00	.37**	.27**	.15**	-.10	.09					
7. Contextual acceptability	4.16	1.39	.69**	.63**	.26**	-.23**	.17**	.36**				
8. DRSS	2.84	1.13	.15**	.12*	.10*	-.24**	-.23**	.10*	.06			
9. Attitudes	4.56	1.49	.80**	.76**	.34**	-.24**	.07	.38**	.71**	.12*		
10. Driving Externality	5.80	0.74	-.05	-.01	.01	.06	.13**	.05	-.02	.13**	.02	
11. Driving Internality	6.40	3.70	.08	.15**	.05	-.05	.23**	.06	.12*	-.04	.12*	.01

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$, DRSS = Driving Related Sensation Seeking

Concerning uses of FAD, participants said they would use it 67.2% of the time to undertake parking maneuvers, $SD = 36.6$, 62.3% of the time on highways, $SD = 34.4$, and 60%

of the time in traffic congestion, $SD= 38.9$. FAD in built-up areas would be used 29% of the time, $SD= 32.5$.

3.3.2. Regression analysis

A hierarchical linear regression was performed to test which were the predictors of intention to use an automated car. The dependent variable was the item: "*I would be ready to use an automated car instead of a regular car*". Three steps were used to introduce the 7 independent variables of the analysis: gender, age, and DRSS score for the first step, interest in using FAD while impaired and contextual acceptability for the second step, and finally attitudes toward FAD for the third step.

The model accounted for 67.1% of the variance of the intention to use an automated car (see Table 3). Simple effects analyses showed that intention to use an automated car was reliably affected by the attitudes toward driving automation, $\beta= 0.616$, $p<.001$, contextual acceptability, $\beta= 0.238$, $p<.001$, and sensation seeking, $\beta= 0.067$, $p<.05$. An effect of the gender only in the first step, $\beta= -0.161$ $p<.05$ was also observed, meaning men were a bit more interested in using such a car than women. Notwithstanding, when contextual acceptability was included in the regression, gender became no longer significant. There was no significant effect of age. Moreover, interest in using driving automation while impaired explained a part of intention to use FAD when it was included in the second step of the regression, $\beta= 0.11$, $p<.05$. Nonetheless, this effect became insignificant as soon as the attitudes toward driving automation were introduced in the third and last step. Driving related sensation seeking explained a part of the variation in every step of the analysis. This part was more important in the first step, $\beta= 0.136$, $p<.05$ than in the last step, $\beta= 0.067$, $p<.05$.

Table 3

Hierarchical linear regression of the intention to use a fully automated car ($N = 389$)

	ΔR^2	Step 1	Step 2	Step 3
<i>Step 1</i>	.05			
Gender		-.16**	-.04	.02
Age		.09	-.02	.02
DRSS		.14*	.09*	.07*
<i>Step 2</i>	.43			
Interest in impaired driving			.11**	.04
Contextual acceptability			.63***	.24***
<i>Step 3</i>	.19			
Attitude				.62***

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$, gender is a dummy variable, coded Male = 1 and Female = 2, DRSS = Driving Related Sensation Seeking

4. Discussion

Fully automated driving (FAD) is something rather new in France, and few people had interactions with that kind of technology. For this reason, this research aimed at predicting intention to use such a vehicle, according to *a priori* acceptability, attitudes, gender, and personality traits. As expected, slightly more than two thirds of the drivers from the sample would *a priori* be favorable to use FAD (i.e. scored above the median point of the likert scale) (H1). This result was congruent with those found previously concerning ADAS and partial automation (Nilsson, 1995; Saad & Villame, 1996; Stanton *et al.*, 1997; de Waard *et al.*, 1999), except that drivers were asked to answer according to a description of FAD. At last, it is possible that drivers could have a negative judgment on people using FAD (Lefevre *et al.*, 2008), and this should be tested in further studies.

Furthermore, uses and attitudes toward this new automobile technology were underlined. As frequently found in the field of driving behavior, a strong positive correlation between attitudes and intention to use FAD was observed (H2). Intention to use FAD was partially ($R^2 = 0.67$) explained by attitudes ($\beta = 0.62$), contextual acceptability ($\beta = 0.24$) and

the DRSS ($\beta = 0.067$). Interest in using FAD while impaired, gender and age were not significant in the last step of the linear regression.

As expected, the higher the driving-related sensation-seeking, the more drivers intended to use FAD (H3a). Nevertheless, the DRSS (7 items) did not allow telling if this result was linked to adventure or novelty seeking, disinhibition or boredom, according to Zuckerman's sensation-seeking scale (1994). For instance, one could think that novelty seeking would increase intention to use FAD in the first place, but once used to FAD, drivers may not feel novelty anymore. Moreover, using FAD in the long run might be in contradiction with the pleasure of driving. It could also be assumed that avoiding boredom in traffic congestion or on the highway by performing another task might appeal to sensation seekers as well. Nonetheless, these detailed relations between sensation-seeking dimensions and intention would need another study to be assessed.

Unexpectedly, no correlations were found between the external driving locus of control and neither *a priori* acceptability nor attitudes toward the automated car (H3b). This might be explained by the insignificant correlation found between the two internal-externality scales, whereas Montag and Comrey (1987) found a negative one, $r = -.18$. It is also possible that it came from the scale's adaptation in French. Moreover, externals might need to use this kind of technology to evaluate the system's skills compared to theirs. This should be addressed in future research concerning FAD.

Intention to use a FAD system varied according to the use cases (H4). Indeed, the preferred situations for using a fully automated car were monotonous (e.g. highways) or stressful driving conditions (e.g. traffic congestion). FAD was perceived positively when related to these use-cases. This result was congruent with studies dealing with ACC in monotonous driving situations (Fancher *et al.*, 1998; Saad & Villame, 1996): FAD, by controlling longitudinal, lateral control and maneuvers would make monotonous or stressful

driving less unpleasant. Nevertheless, in the present study FAD would be less often used in built-up areas - which could be considered a stressful situation - maybe because drivers felt more confident in their own skills when road hazards were considered to happen more frequently. Level of stress and difficulty might be more important in built-up areas than in other use cases. This result echoed the interviews from the first pilot study. Manufacturers should be interested in these results because low-speed automated driving systems that exist nowadays are designed to be used in built-up areas or in traffic situations. As said for *a priori* acceptability and intention to use a fully automated car, drivers' intention to use such a system might vary with experience and use of the system.

Almost 71% of the participants declared they would be interested in using FAD while impaired (H5). This result could seem surprising compared to manual driving. Indeed 45% of French car drivers declared having driven after having drunk, even a small amount of alcohol in study's past month; in Europe, on average 31% of car drivers drunk a small amount of alcohol before driving (Cestac & Delhomme, 2012). It can be assumed that FAD was seen as a transportation facilitating mobility of impaired drivers, although being physically and psychologically able to drive is required by the Vienna Convention (1968). This result confirmed the link between the DRSS and risky-driving, and was congruent with results found in previous studies between high sensation seeking and driving risk-taking behavior (Cestac, Paran & Delhomme, 2011; Delhomme, Verlhac & Martha, 2009; Yagil, 2001). Moreover, it is possible that this result would be related to behavioral adaptation. Indeed, using a FAD system might inhibit the feeling of driving, decreasing the need of being in control and being responsible for the vehicle. Therefore, participants may anticipate an opportunity to drive although impaired or even an opportunity to perform a task unrelated to driving when using automated driving e.g. reading the newspaper or taking care of younger passengers. This result highlighted the importance of making aware both manufacturers and

drivers on the potential risk of FAD misuses. Furthermore, it can be argued that other kinds of drivers could be tempted by FAD misusing, e.g. when the driving license is no longer available or when drivers are disabled. Indeed, FAD could be a solution for individuals who cannot drive anymore, as suggested by participants in the pilot studies (i.e. section 2.1.4.). For example, a medical authorization could be delivered to enable disabled people to use FAD in specific conditions, in order to increase their autonomy if policies allow it.

Compared to women, men had more positive attitudes toward FAD and wanted to both use and buy it more. This result is in line with what was expected (H6). However, when contextual acceptability and interest in using FAD while impaired were added in the regression, gender became insignificant.

Questions about the desired level of automation asked to the participants of the second pilot study did not have straightforward results, maybe because participants could not imagine accurately the possible interactions with the automated driving system. It can be assumed that those results pointed out the difficulty for drivers to envision what it would be like to use an automated car without experiencing it. Difficulties to evaluate *a priori* acceptability were here emphasized. Indeed, considering that trust in an ADAS depends on the perceived performance and reliability by users (Maltz, Sun, Wu, & Mourant, 2004 ; Moray, Inagaki, & Itoh, 2000 ; Riley, 1994), trust in automation could have had an influence on the evaluation. FAD acceptability might be better evaluated after experiencing it, (i.e. acceptance) or seeing it performing a trip, which was not the case in this study. Further research should consider adding pictures, videos or real exhibitions to evaluate this uncommon technology *a priori* acceptability.

Drivers might have different attitudes and intention to use after experiencing and using FAD. Indeed, it had been shown that practicing regularly a new technology might lead to automation complacency bias (Terrade *et al.*, 2009), defined as *a psychological state*

characterized by a low index of suspicion (Wiener, 1981). In other words, when someone is assisted by an automated device and has to switch from performing a task himself or herself to monitoring the operation, he or she can face difficulties to react efficiently when the device fails (Parasuraman *et al.*, 1993). Further research should thus take into consideration evaluating attitudes and intention before, during and after experiencing FAD. Using a driving simulator to evaluate these dimensions should be an interesting alternative.

Finally, implications of this research are varied. First of all, the interest in using FAD while impaired probably means that drivers are not quite ready to stay in the control loop in fully automated mode (Kaber & Endsley, 1997). Indeed, if drivers are released from the driving task, they may be tempted to also give up supervising, or even to consider they are no longer responsible for neither the car nor the driving. It seems clear this device will be used to substitute drivers and let them realize another task. This is coherent with the findings found by van Driel, Hoedemaeker and van Arem (2007), concerning traffic congestion: “drivers do not make a problem of handing over control to the car during such an uncomfortable driving task”. Driving could thus be considered a secondary task when it is delegated, as the limit between being a passenger or a driver is blurry. Besides, if responsibility is not clearly attributed, one can consider being able to use FAD in spite of being impaired or disabled. The second implication deals with the consequences of being out of the control loop or impaired while using FAD. Difficulties to recover manual control, whether happening in an emergency scenario or not, should be a problem and highlight an important matter of performance. Indeed, drivers being out of the loop are exposed to mental underload, which increases the difficulty to recover manual control, particularly in hazardous and emergency situations (Young & Stanton, 2007). As a matter of fact, recovering manual control while being out of the control loop might be a difficult maneuver, even if drivers are not impaired. Public policies should take into consideration these results to define clearly what the necessary

conditions to use FAD are. Manufacturers might prevent impaired driving by making drivers' status monitoring devices a standard in fully automated cars, as some of them have already included such devices in their prototype (e.g. Audi's *Piloted Driving* system).

In order to raise intention to use FAD, one should evaluate attitudes toward FAD because they were the main predictors of its intention to use. Moreover, we assumed that intention to use FAD would be more important if drivers were presented NHTSA's level 4 of automation, because they would not have to supervise the driving, implying no responsibility for it. According to the results, drivers were not quite ready to endorse responsibility for the driving, considering their interest in using it while impaired. Therefore, it could be argued that automated vehicles should be able to drive autonomously without requiring any intervention from the driver, as human error is considered the main cause in both roadway and aircrafts crashes. Nevertheless, if operators make errors when using automated systems, automation is also exposed to designers' errors (Bainbridge, 1983; Parasuraman & Riley, 1997).

5.Study limitations

Social desirability bias in a questionnaire refers to respondents' perception of what is correct or socially acceptable (Maccoby & Maccoby, 1954). However, in this survey, participants were not observed while answering the online questionnaire, which might lessen this effect (Leggett *et al.*, 2003). Generalizing the results should be done with caution because the sample consisted of an unbalanced gender proportion. Moreover, the questionnaire was partially broadcast on specific mailing lists, and it was not possible to determine the proportion of this particular population. Usually familiar with the field of human-machine interaction, these individuals might have more positive attitudes toward FAD. Nevertheless, no effects of the academic degree were observed on the results. Next research on FAD acceptability should control this sampling bias anyway.

In addition, participants' interest in technology was not evaluated in this study. Technophiles might be more enthusiastic about envisioning driving in a fully automated car than others.

6.Conclusions

Concerning *a priori* acceptability of FAD, two thirds of the sample had a mean score greater than the median point of the scale. Even though participants did not try such a car, they had positive attitudes toward it. However, intention to use FAD was different from one driving environment to another. It was also closely linked to the attitudes toward such a system, the contextual acceptability, the interest in using it while impaired and finally the DRSS score.

Furthermore, contextual acceptability explained a part of intention to use that was not explained entirely by attitudes. Further research should include the pleasure of driving when addressing FAD acceptability.

Overall, the present study provided a tool to assess FAD acceptability in future research. Moreover, attitudes and *a priori* acceptability appeared to be complementary concepts when evaluating intention to use FAD. Finally, manufacturers should be aware that there is a potential risk of misuse that should be taken into account when developing and designing FAD.

Acknowledgements

This work has been carried out within the framework of the VeDeCoM Institute, which contributed to support the study. We also would like to thank the two reviewers and the guest Editor who contributed to ameliorate this paper.

References

- Albarracín, D. E., Johnson, B. T., & Zanna, M. P. (2005). The handbook of attitudes. Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Bagozzi, R. P. (1981). Attitudes, intentions, and behavior: A test of some key hypotheses. *Journal of personality and social psychology*, 41(4), 607.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.
- Boutelier, J. (2013, December). Next Two: Renault lancer sa voiture robot avant 2020 [Video file]. retrieved from http://fr.itweb.tv/Next-Two-Renault-lancera-sa-voiture-robot-avant-2020_v1328.html
- Browne, M. W., & Cudeck, R. (1989). Single sample cross-validation indices for covariance structures. *Multivariate Behavioral Research*, 24(4), 445-455.
- Cestac, J. & Delhomme, P. (Ed) (2012). European road users' risk perception and mobility, The SARTRE 4 survey, Lyon France: Public Imprim.
- Cestac, J., Paran, F., & Delhomme, P. (2011). Young drivers' sensation seeking, subjective norms and perceived behavioral control and their roles in predicting speeding intention: How risk-taking motivations evolve with gender and driving experience. *Safety Science*, 49, 424-432.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 13(3), 319-340.
- Davis, F.D., Bagozzi, R.P., & Warshaw, P.R. (1989). User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models, *Management Science*, 35, 982-1003.
- Delhomme, P. (2002). Croyances des jeunes automobilistes en matière de vitesse. Rapport final. Convention DSCR-INRETS N°00/010/T-étude N°7.

- Delhomme, P., & Meyer, T. (2002, 2ème édition). Les projets de recherche en psychologie sociale : méthodes et techniques. La recherche en psychologie sociale. Projets, méthode et techniques. Paris : Armand Colin, Coll. Cursus.
- Delhomme, P., Verliac, J.-F., & Martha, C. (2009). Are drivers' comparative risk judgments about speeding realistic? *Journal of Safety Research*, 40, 333-339.
- Desmond, P.A., & Hoyes, T.W. (1996). Workload variation, intrinsic risk and utility in a simulated air traffic control task: evidence for compensatory effects. *Safety Science*, 22, 87-101.
- de Waard, D., van der Hulst, M., Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K. A. (1999). Driver behavior in an emergency situation in the Automated Highway System. *Transportation Human Factors*, 1, 67-82.
- Eagly, A. H., & Chaiken, S. (1993). *The psychology of attitudes*. Orlando, FL: Harcourt Brace Jovanovich.
- European Commission. (2011). WHITE PAPER: Roadmap to a Single European Transport Area—Towards a competitive and resource efficient transport system. COM (2011), 144.
- Fancher, P., Ervin, R., Sayer, J., Hagan, M., Bogard, S., Bareket, Z., Mefford, M., & Haugen, J. (1998). Intelligent cruise control field operation test. Final Report. NHTSA Report No. DOT HS 808 849.
- Fishbein, M., & Ajzen, I. (1975). *Belief, attitude, intention and behavior: An introduction to theory of research*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 461-472.
- Guizzo, E. (2011). How google's self-driving car works. *IEEE Spectrum Online*, October, 18.
- Hancock, P.A., & Parasuraman, R. (1992). Human Factors and Safety in the Design of Intelligent Vehicle-Highway Systems (IVHS). *Journal of Safety Research*, 23, 181-198.

- Hancock, P.A., & Verwey, W.B. (1997). Fatigue, workload and adaptive driver systems. *Accident Analysis and Prevention*, 29, 495–506.
- Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K.A. (1998). Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC). *Transportation Research Part F*, 1, 95-106.
- Hoedemaker, M., & Kopf, M. (2001). Visual sampling behavior when driving with adaptive cruise control. In *Proceedings of the 9th International Conference on Vision in vehicles Australia*, August 19-22, 2001.
- Hu, L.T. & Bentler, P.M. (1999). Cut-off criteria for fit indexes in covariance structure analysis. Conventional criteria versus new alternatives. *Structural Equation Modeling*, 6(1), 1-55.
- Jamson, A. H., Merat, N., Carsten, O. M., & Lai, F. C. (2013). Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 30, 116-125.
- Jonah, B. A., Thiessen, R., & Au-Yeung, E. (2001). Sensation seeking, risky driving and behavioral adaptation. *Accident Analysis & Prevention*, 33(5), 679-684.
- Jöreskog, K. G., & Sörbom, D. (1989). *LISREL 7: A guide to the program and applications* (Vol. 2). Chicago: Spss.
- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out- of- the- loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, 16(3), 126- 131.
- Lefevre, R., Bordel, S., & Guingouain, G. (2008). Sentiment de contrôle et acceptabilité sociale a priori des aides à la conduite. *Le travail humain*, 71(2), 97-135.
- Leggett, C., Kleckner, N., Boyle, K., Duffield, J., & Mitchell, R. (2003). Social desirability bias in contingent valuation surveys administered through in-person interviews. *Land Economics*, 79(4), 561–575.

- Laurencin, J.-P., Hoffman, J., Forest, F., & Ruffieux, B. (2004). Retrieved May 19, 2009, from
[www.mshalpes.prd.fr.Website:www.mshalpes.prd.fr/luce/documents/presentations/Axe4_Acceptabilite_Forest_19052004.ppt](http://www.mshalpes.prd.fr/Website:www.mshalpes.prd.fr/luce/documents/presentations/Axe4_Acceptabilite_Forest_19052004.ppt).
- Maccoby, E., & Maccoby, N. (1954). The Interview: A Tool of Social Science. *Handhook of Social Psychology*, I, 449-487.
- Maltz, M., Sun, H., Wu, Q., & Mourant, R. (2004). In-vehicle alerting system for older and younger drivers: Does experience count? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1899(1), 64-70.
- Montag, I., & Comrey, A.L. (1987). Internality and externality as correlates of involvement in fatal driving accidents. *Journal of Applied Psychology*, 72, 339-343.
- Moray, N., Inagaki, T., & Itoh, M. (2000). Adaptive Automation, Trust, and Self-Confidence in Fault Management of Time-Critical Tasks. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, (6)-1, 44-58.
- National Highway Traffic Safety Administration. (2013). *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles System*. Washington, DC.
- Nilsson, L. (1995). Safety effects of adaptive cruise control in critical traffic situations. In *Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems: Vol. 3* (Tokyo: Vehicle, Road and Traffic Intelligence Society), 1254–1259.
- Özkan, T., Lajunen, T., & Kaistinen, J. (2005). Traffic locus of control, driving skills, and attitudes towards in-vehicle technologies (ISA and ACC). In *Proceedings of the 18th international cooperation on theories and concepts in traffic safety (ICTCT)*, Helsinki, Finland.
- Parasuraman, R. & Riley, V. A. (1997). Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse, *Human Factors*, 39(2), 230-253.

- Parasuraman, S., Singh, I. L., Molloy, R., & Parasuraman, R. (1992). Automation-related complacency: A source of vulnerability in contemporary organizations. *IFIP Transactions A—Computer Science and Technology*, 13, 426–432.
- Piccinini, G. F., Simões, A., Rodrigues, C. M., & Leitão, M. (2011). Assessing driver's mental representation of Adaptive Cruise Control (ACC) and its possible effects on behavioural adaptations. *Work (Reading, Mass.)*, 41, 4396-4401.
- Robson, C. (1993). *Real world research. A resource for social scientists and practitioner-researchers*. Oxford UK and Cambridge USA, Backwell.
- Riley, V. (1994). *Human use of Automation*. Unpublished doctoral dissertation, University of Minnesota, Minneapolis.
- Rotter, J. B. (1966). Generalized expectancies for internal versus external control of reinforcement. *Psychological monographs: General and applied*, 80(1), 1-28.
- Rudin-Brown, C. M., & Ian Noy, Y. (2002). Investigation of behavioral adaptation to lane departure warnings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1803(1), 30-37.
- Rudin-Brown, C.M., & Parker, H.A. (2004). Behavioural Adaptation to Lane Departure Warning. *Transportation Research Record*, 1803, 30-37.
- Saad, F., Hjälm Dahl, M., Cañas, J., Alonso, M., Garayo, P., Macchi, L., Nathan, F., Ojeda, L., Papakostopoulos, V., Panou, M., & Bekiaris, E. (2004). Literature review of behavioural effects. *Rapport AIDE*.
- Saad, F., & Villame, T. (1996). Assessing new driving support systems: contribution of an analysis of drivers' activity in real situations. *Proceedings of Third Annual World Congress on Intelligent Transport System (CD Rom)*.
- Stanton, N.A., & Marsden, P. (1996). From fly-by-wire to drive-by-wire: Safety implications of automation in vehicles. *Safety Science*, 24, 35-49.

- Stanton, N.A., & Young, M.S. (1998). Vehicle automation and driving performance, *Ergonomics*, 41-7, 1014-1028. doi.org/10.1080/001401398186568
- Stanton, N.A., & Young, M.S. (2005). Driver behaviour with adaptive cruise control. *Ergonomics*, 48(10), 1294-1313. doi:10.1080/00140130500252990
- Stanton, N.A., Young, M.S. & McCaulder, B. (1997). Drive-by-wire: The case of driver workload and reclaiming control with Adaptive Cruise Control. *Safety Science*, 27, 149-159.
- Stanton, N.A., Young, M.S., Walker, G.H., Turner, H., & Randle, S. (2001). Automating the driver's control tasks. *International Journal Of Cognitive Ergonomics*, 5(3), 221-236. doi:10.1207/S15327566IJCE0503_5.
- Taubman, O., Mikulincer, M., & Iram, A. (1996). The cognitive, motivational and emotional system of driving. Research report, Department of Casualties and Road Safety of the Israeli Army, Israel.
- Terrade, F., Pasquier, H., Reerinck-Boulanger, J., Guingouain, G. & Somat, A. (2009). L'acceptabilité sociale: la prise en compte des déterminants sociaux dans l'analyse de l'acceptabilité des systèmes technologiques. *Le Travail Humain*, 72, 383-395.
- van der Laan, J.D., Heino, A., & de Waard, D. (1997). A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics. *Transportation Research Part C*, 5, 1-10.
- van Dijke, J. P., & van Schijndel, M. (2012). CityMobil, advanced transport for the urban environment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2324(1), 29-36.
- van Driel, C. J. G., Hoedemaeker, M., & Van Arem, B. (2007). Impacts of a Congestion Assistant on driving behaviour and acceptance using a driving simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 10(2), 139-152.

- Venkatesh, V., Morris, M. G., & Ackerman, P. L. (2000). A Longitudinal Field Investigation of Gender Differences in Individual Technology Adoption Decision Making Processes, *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 83(1), 33-60.
- Ward, N.J., Fairclough, S. & Humphreys, M. (1995). The effect of task automatisisation in the automotive context: a field study of an autonomous intelligent cruise control system. Paper presented at International Conference on Experimental Analysis and Measurement of Situation Awareness, 1 November, Daytona Beach, FL.
- Ward, N.J., Humphreys, M., & Fairclough, S. (1996). A field study of behavioural adaptation with an autonomous intelligent cruise control system. *Handbook of the International Conference on Traffic and Transport Psychology*, 22-25 May, Valencia, Spain, 15-19.
- Wiener, E. L. (1981). Complacency: Is the term useful for air safety? In *Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar*, 117, Denver: Flight Safety Foundation, Inc.
- Yagil, D. (2001). Reasoned action and irrational motives: A prediction of drivers' intention to violate traffic laws. *Journal of Applied Social Psychology*, 31, 720–740.
- Young, M. S., & Stanton, N. A. (1997). Automotive automation: Investigating the impact on drivers' mental workload. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 1(4), 325-336.
- Young, M. S., & Stanton, N. A. (2007). What's skill got to do with it? Vehicle automation and driver mental workload. *Ergonomics*, 50(8), 1324-1339. doi:10.1080/00140130701318855.
- Zuckerman, M. (1994). *Behavioural Expressions and Biosocial Bases of Sensation Seeking*. Cambridge: University of Cambridge Press.

5. Article de l'étude 2

Title: Fully automated driving: impact of trust and practice on manual control recovery

Authors: William PAYRE^{a,b}, Julien CESTAC^b & Patricia DELHOMME^b

a VeDeCom Institute

b French Institute of Science and Technology for Transportation, Development, and Networks

Acknowledgements

This work has been carried out within the framework of the VEDECOM Institute, which contributed to support the study. The contributions of Anissa Dumesnil (LAPPS, University of Paris Ouest), Nguyen Thong Dang and Fabrice Vienne (LEPSIS, IFSTTAR) are gratefully acknowledged.

Abstract

Objective: An experiment was performed in a driving simulator to investigate the impacts of practice, trust, and interaction on manual control recovery when employing fully automated driving (FAD).

Background: To increase the use of partially or highly automated driving efficiency and to improve safety, some studies have addressed trust in driving automation and training, but few studies have focused on FAD. FAD is an autonomous system that has full control of a vehicle without any need for intervention by the driver.

Method: A total of 69 drivers with a valid license practiced with FAD. They were distributed evenly across two conditions: simple practice and elaborate practice.

Results: When examining emergency manual control recovery, a correlation was found between trust and reaction time in the simple practice group (i.e., higher trust meant a longer reaction time), but not in the elaborate practice group. This result indicated that to mitigate the negative impact of overtrust on reaction time, more appropriate practice may be needed.

Conclusions: Drivers should be trained in how the automated device works so as to improve manual control recovery (MCR) performance in case of an emergency.

Application: The practice format used in this study could be used for the first interaction with an FAD car when acquiring such a vehicle.

Keywords: fully automated driving; manual control recovery; practice; trust

Précis:

Fully automated driving introduces new skills development. Hence, this study examines the response time when manual control recovery is needed and the interaction between trust in the system and practice. The results showed that impact of overtrust on response time in case of emergency was mitigated by extensive practice.

1. Introduction

1.1. Trust as a determinant of the use of automation

Since cars have become increasingly automated, the ultimate goal for driving automation is fully automated driving (FAD). Depending on the types and levels of automation (Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2000), FAD has high automation levels for a) information acquisition (i.e., sensing and registering input data: lane marking, nearby objects), b) information analysis (i.e., inferential processes and prediction: safe distance needed between vehicles), c) decision selection (i.e., selection among alternatives: choosing secondary roads to avoid traffic), and d) action implementation (i.e., executing the chosen action: overtaking, braking, accelerating, etc.). This technology is aimed primarily at increasing safety, reducing fuel consumption, and improving driver comfort by decreasing both the physical and mental workload. However, automation only effectively reduces active fatigue, not passive fatigue (May & Baldwin, 2009; Saxby, Matthews, Warm, Hitchcock, & Neubauer, 2013). FAD is an autonomous system that requires no intervention from the driver except in specific conditions (National Highway Traffic Security Administration's level 3 of driving automation and above, 2013).

However, by examining how to enhance the joint human-system efficiency, previous studies have determined the potential misuses and abuses of automation (Parasuraman & Riley, 1997; Lee & See, 2004). The efficiency of an automated system often depends on the operators' level of trust in that system. Indeed, trust has been recognized as an important determinant of system performance (e.g., Lee & Moray, 1992), as well as one of the main predictors of automation use (Parasuraman & Riley, 1997). Therefore, there might be a correlation between trust and FAD driving performance. Trust is defined as *the attitude that an agent will help achieve an individual's goal in a situation characterized by uncertainty and vulnerability* (Lee & See, 2004, p.54). Since trust is considered a dynamic process (Cohen, Parasuraman & Freeman, 1998; Lee & Moray, 1994; Wickens & Hollands, 2000), an operator's trust in a system evolves as a result of experience with the system (Muir & Moray, 1996). Hence, the level of trust can vary after using an automated device and could be measured after a first interaction with the system. Therefore, it seems reasonable to measure trust *a posteriori* as operators face problems and difficulties when assessing a machine's capability, which has been found to sometimes lead to poor calibration (Muir, 1987, p. 530).

Previous research addressing calibration, which refers to the match between the abilities of the automation and the person's trust in the automation (Lee & Moray, 1992), has found that poor calibration can have different consequences such as *overtrust* or *distrust*. Overtrust occurs when the person's trust in the automated machine is greater than that warranted by the abilities of the machine, whereas distrust refers to a person not believing in the abilities of the automation (Lee & See, 2004, p. 55). Evaluating trust could help understand driver behavior in the FAD mode in terms of response time when manual control recovery (MCR) is needed, which is one of the most important interactions between the driver and the system. As it is impossible to design a perfect automated machine, the transition (i.e., the decision to make a transition, the time taken to do so and the quality of the maneuver) between the fully automated mode and manual driving is crucial to the safety of the driver (Hoc, Young, & Blosseville, 2009).

1.2. Manual control recovery

Leaving the control loop is a potential consequence of automation (Kaber & Endsley, 1997; Stanton & Young, 1998). In this situation, individuals are disconnected from the activity they are engaged in. Leaving the control loop may be problematic when MCR is needed, causing drivers to face difficulties when MCR must be performed in emergency situations (Desmond, Hancock & Monette, 1998; de Waard, van der Hulst, Hoedemaeker, & Brookhuis, 1999). These results are consistent with a study led by Hoc, Mars and Milleville-Pennel (2006), in which drivers used auto-steering but had to manually recover control to avoid obstacles. The authors observed interference between the driving styles when drivers sought to regain manual control.

MCR difficulties could be explained as complacency because the drivers rely on the system to handle the driving tasks they would usually perform manually (Stanton, Young, Walker, Turner, & Randle, 2001; Young & Stanton, 2007). Contrary to a high level of trust, complacency is *a psychological state characterized by a low index of suspicion* (Wiener, 1981, p.119), even though no consensus exists concerning the definition of this concept (Parasuraman & Monzey, 2010). Overtrust, which occurs when the trust surpasses a level warranted by the abilities of the automated machine (Lee & See, 2004, p.55), could be evidence of complacency and is supposedly a major issue for initiating MCR in FAD. If operators totally rely on the automated system to drive their vehicle, they might not expect to have to recover control quickly (i.e., in an emergency situation), which could lead to longer

delays when human intervention is needed. This is congruent with the assumption that a joint human-automated system can be improved if appropriately trusted (Wickens, Gempfer, & Morphew, 2000), i.e., if overtrust and distrust are avoided. Further, as complacency might affect the safety of drivers when they trust the adaptive cruise control excessively (Inagaki & Furukawa, 2004), investigating this phenomenon with fully automated vehicles is of potential interest.

1.3. Automated driving training, practice and use

Human-system control transition in an automated system is of major concern to traffic safety enhancement if drivers are not fully trained (Inagaki, 2006). Brookhuis and de Waard (2006) and Hoc *et al.* (2009) suggested that specific training should be considered to assist drivers to move to manual control safely. Similar suggestions have been made concerning the positive effect of crash avoidance training with autopilot-equipped aircraft (McClellan, 1994). Inadequate training was considered one of several factors leading to manual control errors in certain flight accidents (Federal Aviation Administration, 2013). Introducing FAD to non-professional drivers to practice new maneuvers such as engaging automation mode and recovering control could assist drivers when using such a system for the very first time.

Some driving automation studies have examined the time required to improve performance in Advanced Driver Assistance Systems usage (ADAS). In a 130 km run split into five trials using adaptive cruise control (ACC), Kopf and Nirschl (1997) demonstrated that drivers were able to understand the partially automated system behavior, resulting in fewer interventions from the driver as well as lower workload levels. Familiarity with the ACC operation was observed after two weeks of use (Weinberger, Winner, & Bubb, 2001) and, according to the authors, this period was a major part of the learning process. Kopf and Simon (2001) also examined the different stages of ACC learning and found that operators first learnt how to operate the system to understand its limits and then used it according to the specificity of the driving environment. The concepts of *learnability* and *self-explanatory systems* were also highlighted by Manstetten, Krautter, Engeln, Zahn, Simon, Kuhn *et al.* (2003), who sought to define the ADAS design features needed to facilitate learning. However, these studies did not give details regarding the explicit elements needed for the driving automation learning content. Several studies have highlighted the need to optimize driving automation learning stages (Saad, Hjalmdahl, Cañas, Alonso, Garayo, Macchi *et al.*, 2004).

The first skill needed when learning how to use FAD is maneuvering, as suggested in the Goals for Driver Education framework (Hatakka, Keskinen, Gregersen, Glad, & Hernetkoski, 2002). Therefore, practicing MCR is considered as learning basic FAD maneuvering skills and is examined in this study.

Even though it could be considered that the more practice a driver has, the better their performance, the question is how much training is needed to improve FAD skills. Assuming that such skills exist, the efficiency of a short practice session could be examined for non-professional drivers using FAD for the first time. This situation is congruent with a typical first interaction situation when acquiring a fully automated car.

2. Hypotheses

This study addresses the impact of trust in FAD and FAD practice on anticipated MCR as well as in cases of emergency in a driving simulator. For this reason, the question of behavior in the FAD mode is addressed by analyzing the effect of both practice and trust on reaction time in anticipated and emergency situations. Practice in this study is split into two conditions: simple and elaborate. Drivers with a low level of trust in FAD are expected to recover control in a perceived dangerous situation because they distrust the system (Lee & Moray, 1992) as they have little experience with this technology (H1). In terms of complacency because of overtrust, drivers with a high level of trust in FAD are expected to recover manual control slower than those drivers who have poor or moderate trust in the FAD (Parasuraman & Riley, 1997) (H2). Since they perform greater MCR, elaborate practice drivers are assumed to react faster than drivers who have had only simple practice when MCR is both anticipated and urgent (Hoc *et al.*, 2009; Hoc, Mars, & Milleville-Pennel, 2006) (H3). Finally, an interaction effect between practice and trust on manual control recovery performance is expected. It is assumed that elaborate practice moderates the negative effects of overtrust and distrust in FAD as the trust is better calibrated (Lee & Moray, 1992) (H4).

In order to test these hypotheses, participants were randomly assigned to the experimental conditions (i.e., simple vs. elaborate practice) to balance the groups for age and gender.

3. Method

3.1. Apparatus

IFSTTAR's driving simulator with a fixed platform was used (see Figure 1). The equipment had ten screens and visual channels ($2.44\text{ m} \times 1.83\text{ m}$) that provided a 360° view, as well as an instrumented vehicle. The instrumented vehicle was positioned in the center of seven screens with an additional triptych facing the driver, two screens on each side of the vehicle, and three screens fixed to the back of the vehicle. The refresh rate of these panels was 60 Hz. Seven of these panels were equipped with a classic video projector (F22 Projection Design, 1080p), whereas the other three had a Titan stereoscopic video projector (Digital Projection SX, 1080p). Different driving parameters (e.g., speed, acceleration, braking, etc.) were registered in accordance with the virtual traffic situation to which the driver was exposed. A tablet computer was fixed on the dashboard between the two front seats and loudspeakers were used in the simulation room. The same written and vocal messages were simultaneously displayed.

Figure 1 The Driving Simulator at the Mobility and Behaviour Psychology Lab (IFSTTAR).



3.2. Participants

69 drivers (37 males) who had valid driving licenses took part in the study, for which they received financial compensation. Drivers were recruited through an advertisement in the participant-recruitment section of a website dealing with science. Two questionnaires were completed by all participants, one before and one after using the simulator (see 3.4. Measures). The mean age of the sample was 38.5; $SD=14.9$, $min=20$, $max=75$. All drivers had

had their driving licenses for more than 19 years on average; $SD=14.9$, $\min=1$, $\max=51$; they answered the questionnaire in August 2013 and had driven an average of 304 km during the week before the questionnaire completion; $SD=627$, $\min=0$, $\max=5000$. Participants were individually tested and then equally distributed among the two groups according to age and gender. Anonymity was maintained throughout the study.

3.3. Procedure

Participants were briefed by the researcher before the commencement of the study. They were told they would participate in an FAD study and they would have to perform three tasks: answering a computerized questionnaire, driving in a simulator, and answering a second computerized questionnaire. They were told they were free to resign from the study at any time, but none decided to do so.

In the pre-experiment questionnaire, the features of the fully automated car were described along with cases of its use: *Automated driving is a vehicle automation system that masters all the driving functions, such as steering, accelerating, braking, maneuvering, and maintaining a safe distance between vehicles. Fully automated cars are certified and can be used by all drivers with a driving license. However, drivers are still responsible for the vehicle and must be seated in the driver's seat with the seat belt fastened.* They were asked if they understood what FAD was and if they had a driving license. If they did, they then answered the questionnaire.

Then all the participants had a first run, a 5-minute familiarization stage, in which they could test the functionality of the controllers. The second run consisted of learning how to operate the automated driving system, which was the independent variable in the two modality study for simple and elaborate practice. Participants from these two conditions were given the following instructions: *You are on a four-lane highway with two lanes of traffic in each direction. You are requested to manually start the engine, accelerate, and keep your speed as close to 130 km/h (80 mph) as possible. You should engage the FAD system as soon as you hear the vocal message and/or read the message on the smart phone fixed to the dashboard. You should leave the FAD engaged for the remainder of the journey unless you feel a need to resume manual control; otherwise you should drive in your usual style.* The steering wheel suitably managed curves whilst maneuvering to increase the reality of the simulation.

Both practice runs lasted approximately 3 minutes. The first group followed a simple practice condition, which consisted of manually starting the engine, reaching 130 km/h, turning on the automated system, turning it off after one minute (anticipated MCR), and finally resuming manual control to stop the car. The second group followed the elaborate practice condition and explored the FAD system more deeply; after turning the FAD on, a car overtook the participants and then the automated car overtook another car. After the overtaking, participants were asked to quickly resume control from the automated driving system because it was going to shut down in 3 s. There were no cars ahead or behind the participants' vehicle. No danger or emergency messages were relayed. Afterwards, they were asked to turn the system on again and finally asked to resume manual control to stop the vehicle.

Manual control of the vehicle was granted instantaneously and always in a straight section of road so that it would be easier for participants to learn to master the vehicle. Because of the 130 km/h simulated inertia, the speed gradually decreased. To engage the FAD system, drivers had to use the headlight device (i.e., one input to engage it, another input to disengage it, always followed by vocal and written feedback on the tablet computer). To recover control, they could use the same device, the steering wheel, or the gas or brake pedal. Before any anticipated MCR, drivers were warned 30 s before control transition by four messages relayed simultaneously over the speakers and on the tablet computer (i.e., *end of FAD zone coming soon; end of FAD zone; please resume vehicle control; auto-pilot mode deactivated* when manual control was resumed). The volume was loud enough for participants to clearly hear the messages and none asked for these to be played louder.

Thereafter, both groups completed the same 18 minute run (see Table 1), in which they were asked to turn on the FAD system after accelerating manually up to 130 km/h with the possibility of resuming manual control whenever they wanted. While in the FAD mode, the car was overtaken, then overtook, braked, accelerated, and turned within the curves. Five minutes later, they were told to resume manual control (i.e., anticipated MCR), and a few minutes later, they were asked to switch on the FAD. Soon after being in FAD mode, the vehicle overtook a car, but while overtaking, a third vehicle suddenly pulled out in front of the driver unexpectedly, resulting in a very short headway between the two vehicles. This potentially dangerous situation was handled by the FAD system, but participants were free to resume control if they wanted to. Ten minutes after the beginning of the run, an alarm rang twice followed instantly by a vocal and written message telling the driver that the system was out of order (i.e., *system failure*). Participants were not aware that such an event would occur.

The FAD system stopped 2 seconds after the alarm stimulus and the *system failure* vocal message (i.e., sudden MCR). The *system failure* event occurred in a straight section of the road and there were no cars ahead of or behind the vehicle. Speed and direction were proportionally affected to the simulate 130 km/h inertia, causing the car to slow down and smoothly deviate to the right. Finally, participants were asked to turn on the FAD one last time and then to resume control (i.e., anticipated MCR) a few minutes after the order to leave the highway.

In the third part of the study, participants answered the second computerized questionnaire. They were then thanked for their time.

Table 1 Description of the two different practice types and the common run.

Type of practice			Duration
	Simple practice	Elaborate practice	
Practice (130 km/h)	manual driving to reach 130 km/h	manual driving to reach 130 km/h	3 min
	FAD activation	FAD activation	
		overtaken by a car	
		overtake a car	
		quick anticipated manual control recovery	
		FAD activation	
	manual control recovery	manual control recovery	
Common run (130 km/h)	manual driving to reach 130 km/h		18 min
	FAD activation		
	overtaken by a car		
	overtake a car		
	brake		
	accelerate		
	turn into curves		
	manual control recovery		
	FAD activation		
	dangerous situation (cut-in)		
	no event (1 min)		
	emergency situation (system failure)		
	emergency manual control recovery		
	FAD activation		
	manual control recovery		

Table 1. Text in bold refers to the fully automated driving mode, whereas the plain text refers to the manual driving mode.

3.4. Measures

In the pre-experimental questionnaire, participants answered an FAD acceptability scale (Payre, Cestac, & Delhomme, 2014); $\alpha=.79$; followed by socio-demographic questions regarding gender, age, years with license, and the kilometers driven in the previous week. The FAD acceptability scale was composed of two dimensions, contextual acceptability, (i.e., *I would rather keep manual control of my vehicle than delegate it to the automated driving system on every occasion; The automated driving system provides me with more safety compared to manual driving; If driving was boring for me, I would rather delegate it to the automated driving system than do it myself; If I had passengers in my automated car, I would rather drive by myself than delegate it to the automated driving system*) and interest in impaired driving, (i.e., *I would delegate the driving to the automated driving system if I was over the drink-driving limit; I would delegate the driving to the automated driving system if I was tired; I would delegate the driving to the automated driving system if I took medication that affected my ability to drive*).

In the post-experimental questionnaire, the FAD acceptability scale was used again. The internal consistency was judged to be acceptable at $\alpha=.79$. Afterwards, participants were asked randomized questions on trust in the FAD; $\alpha=.82$ (6 items): *Globally, I trust the automated driving system; Globally, I trust my capacity to resume control if needed; I trust the automated driving system when overtaking; I trust the automated driving system to keep to a lane; I trust the automated driving system to avoid obstacles; I trust the automated driving system to keep distance from a vehicle ahead*. A 7-point Likert scale was used, ranging from 1: *I strongly disagree* to 7: *I strongly agree*. Post-experience trust toward automated aids has already been collected in previous studies (i.e., Dzindolet, Peterson, Pomranky, Pierce, & Beck, 2003, p. 706).

Performance measured reaction time (i.e., in seconds), starting from the beginning of the alarm signal or the anticipated MCR messages (i.e., audio broadcast and video display) to the first increment made by the operator, whether using the steering wheel or the gas or brake pedals. All MCR reaction times were measured while driving at 130 km/h.

13 participants' recorded files from the simulator were affected by partial data loss (i.e., 6 before the first anticipated MCR, 9 before the emergency MCR, and 13 before the second anticipated MCR). Nonetheless, all were able to experience the full scenario, so all collected data was included in the analysis as there were no measurement errors and participants were all part of the population of interest (Orr, Sackett, & DuBois, 1991).

4. Results

4.1. FAD acceptability descriptive analysis

No significant difference, $F(1,68)=0.5$, $p=.83$, was observed between the two measures of the FAD contextual acceptability, measured before ($M=4.4$, $SD=1.3$, $Min=1.5$, $Max=7$) and after ($M=4.8$, $SD=1.4$, $Min=1$, $Max=7$) interacting with the system.

For the dimension interest in impaired driving, there was a significant decrease, $F(1,66)=4.8$, $p<.05$, $\eta^2=.07$, between the mean score before, $M=5.2$ ($SD=2$, $Min=1$, $Max=7$) and after, $M=4.8$ ($SD=2.1$, $Min=1$, $Max=7$), interacting with the system. Two participants did not answer these items since the choice *not concerned* was available.

Finally, participants scored relatively high on the 7-point FAD acceptability scale, including both dimensions; a priori $M=4.8$ ($SD=1.3$, $Min=1.4$, $Max=7$) and a posteriori $M=4.6$ ($SD=1.4$, $Min=1.5$, $Max=7$).

4.2. Manual control recovery reaction times descriptive and inferential analysis

Drivers recovered control faster the second time that MCR was anticipated than the first time (see Table 2), $F(1,54)=584$, $p<.001$, $\eta^2=.92$. This anticipated MCR reaction time improvement might be because the participants better understood the automated system, leading them to resume control before the messages were fully displayed.

The emergency MCR mean reaction times were faster than both anticipated MCR mean reaction times (see Table 2). Compared to the emergency mean reaction times, the first anticipated MCR mean reaction times were longer, $F(1,56)=141.9$, $p<.001$, $\eta^2=.72$. Similarly, compared to the emergency mean reaction times, the second anticipated MCR mean reaction times (i.e., when participants were asked to leave the highway) were also longer, $F(1,51)=40.1$, $p<.001$, $\eta^2=.44$.

Table 2 Mean reaction times for the three MCR (in seconds). Full sample.

	<i>First anticipated MCR N=63</i>	<i>Emergency MCR N=60</i>	<i>Second anticipated MCR N=56</i>
<i>M</i>	8.7	4.3	6.8
<i>Med</i>	8.1	4.1	7.2
<i>SD</i>	2.7	1.2	2.5
<i>Min</i>	3.6	2	2.7
<i>Max</i>	15.2	8	13.9

Note: Data is missing for First MCR (n=6), emergency MCR (n=9) and Second MCR (n=13).

4.3. Impact of trust and practice on manual control recoveries

Participants scored relatively high on the FAD trust scale, $\alpha=.82$, measured after interacting with the system, $M=5.23$ ($SD=1$, $Min=2.83$, $Max=7$). No significant difference was observed, $F(1,67)=3.3$, $p=.07$, between the two practice conditions (see Table 3).

Concerning the dangerous situations, i.e., a car suddenly cutting-in in front of the participants' vehicle while they were also overtaking, 6 out of 69 participants (8.7%) resumed control. No significant correlation, $r=-.15$, $p=.22$, between the level of trust and the likelihood of initiating MCR during this potentially dangerous situation (i.e., a cut-in situation) was found (H1).

For participants who followed the simple practice condition in the emergency scenario, a positive correlation ($r=.63$, $p<.001$) (see Table 3) was found between the level of trust in FAD and MCR reaction time. This indicated a negative effect for a high level of trust in the MCR in this condition (H2). No such correlation was found for participants who followed the elaborate practice condition (see Table 3).

None of the two anticipated MCR mean reaction times were significantly impacted by either practice conditions (i.e., first anticipated MCR, $F(1,61)=.63$, $p=.43$, second anticipated MCR, $F(1,54)=.08$, $p=.77$) or the level of trust (see Table 3) (H3).

Concerning the emergency situation, no significant difference was found, $F(1,58)=1.16$, $p=.29$, between the mean reaction times to recover control for participants who followed the simple practice session and for those who followed the elaborate practice session (see Table 3).

Table 3 Impact of trust and practice on manual control recoveries

	<i>M</i>		<i>SD</i>		<i>Simple</i>			<i>Elaborate</i>		
	<i>Simple</i>	<i>Elaborate</i>	<i>Simple</i>	<i>Elaborate</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1. 1st MCR reaction time	8.97	8.42	2.89	2.55						
2. Emergency MCR reaction time	4.43	4.09	1.21	1.23	.23			.00		
3. 2nd MCR reaction time	6.93	6.74	2.59	2.39	.71**	.00		.54**	.02	
4. Trust in FAD	5.03	5.47	.86	1.14	.25	.63**	.08	.11	-.08	.16

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$, MCR = Manual control recovery, FAD = Fully automated driving

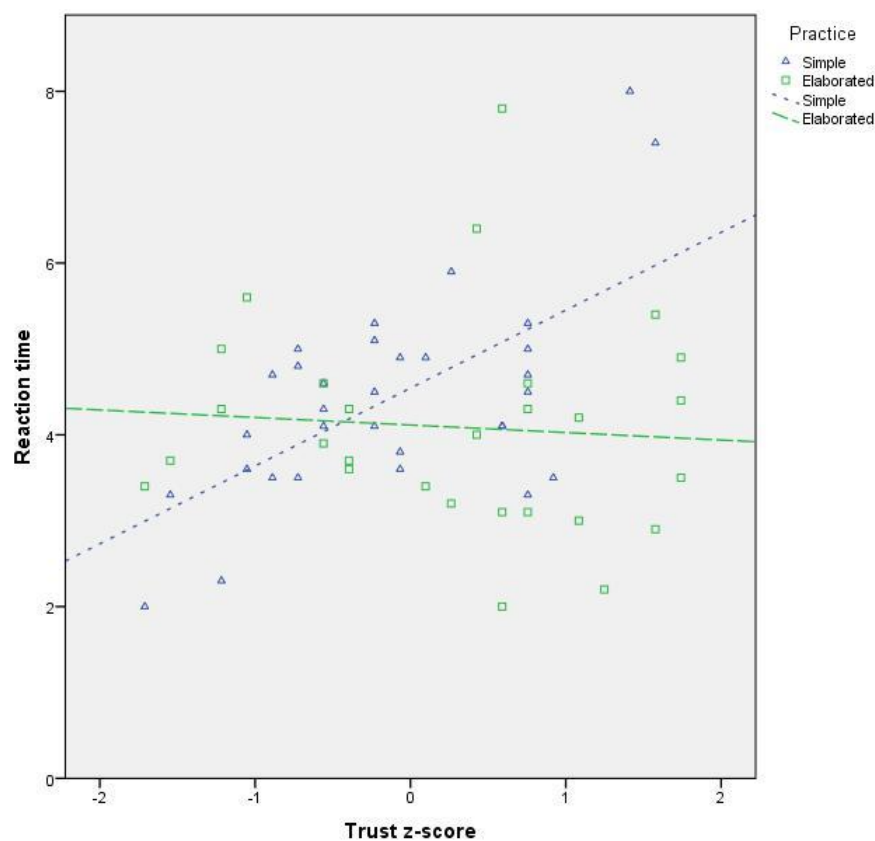
When included separately in a hierarchical-stepwise linear regression, the practice Z-scores did not have an impact on the MCR reaction time in the case of emergency, whereas the trust in the FAD Z-scores were found to have an impact (see Table 4). In addition, the interaction of both dimensions had a significant impact on MCR. For the participants who followed the simple practice session, it was found that the more trust that was declared, the longer the reaction times. Therefore, it could be concluded that the elaborate practice condition mitigated the effects of a high level of trust in MCR reaction time (H4).

Table 4 Hierarchical-stepwise linear regression of the impact of practice and trust (Z-scores) on reaction time in emergency manual control recovery ($N=60$). Adjusted R^2 and R^2 Change (ΔR^2) values were reported.

	<i>Adjusted R²</i>	<i>ΔR^2</i>	Step 1	Step 2
<i>Step 1</i>	.05			
Practice			-.20	-.18
Trust in FAD			.26*	.35**
<i>Step 2</i>	.19	.14**		
Trust in FAD x Practice				-.39**

Note: * $p < .05$, ** $p < .01$.

The impact of trust on reaction time as well as the interaction between trust and practice is shown in Figure 2.

Figure 2 Interaction between practice and trust on reaction time (in seconds)

Men had more trust in the FAD than women; $F(1,67)=10.27$, $p<.01$, $\eta^2=.13$. However, no gender effect was found for the three different MCR reaction times.

5. Discussion

The general aim of the present study was to highlight the impact of trust and practice on MCR performance when using FAD. A negative impact for a high level of trust in FAD on one aspect of driving performance (i.e., MCR reaction time) in an emergency situation was found when participants followed the simple practice condition. This negative impact was mitigated in the elaborate practice condition. Nevertheless, MCR is one aspect of automated driving performance, and further research should take into consideration other parameters, such as the quality of MCR, control of the vehicle, and safe maneuvering.

The first hypothesis was not confirmed: recovering manual control in a potentially dangerous situation (i.e., a cut-in) was not found to be affected by the level of trust (H1). One explanation could be that this simulated event lacked realism, and may have led participants to perceive a low level of danger in this specific situation, resulting in a poor likelihood of initiating MCR. As expected, a high level of trust was positively correlated with MCR reaction time in an emergency situation (H2). Complacency could explain this result, as previously suggested by Hoc *et al.* (2009), since participants with a high level of trust in the FAD system might not have considered a potential failure of the system. The third hypothesis was not confirmed: practice did not have a simple effect on MCR reaction time, whether anticipated or in a case of emergency (H3). It could be argued that the common run was an opportunity for both groups to learn more about how to use the FAD system, which was possibly more important for the simple practice group. Finally, the negative effect of trust on performance was mitigated in the elaborate practice condition, partially confirming the last hypothesis (H4).

Lee and Moray (1992) acknowledged that trust was an important determinant of system performance. Muir and Moray (1996) also found that there was an *inverse relationship between trust and the monitoring of the automation*, meaning that the more trust there was, the less the system was monitored. This could explain why operators left the control loop, since out-of-the-loop performance has been found to be associated with *excessive human trust in computer controllers* (Kaber & Endsley, 1997). In the present study, this inverse relationship was confirmed in the simple practice condition but not confirmed in the elaborate practice condition. In the simple practice condition, drivers with the highest levels of trust had slower reaction times in the emergency scenario than those with lower levels of trust. No such differences were observed when participants followed the elaborate practice. Since both experimental groups trusted the FAD system, they were likely to supervise the system poorly.

Hence, it can be assumed that unless drivers have practiced sufficiently, the more trust there is in the system, the more disconnected the driver may be from the driving activity.

The current study confirmed the results previously found in the same field (Inagaki and Furukawa, 2004), and provided more information on why automation slows braking responses (Neubauer, Matthews, & Saxby, 2012; Saxby, Matthews, Hitchcock, & Warm, 2008) or slows MCR (Young & Stanton, 2007) in an emergency scenario (i.e., system failure). This had been attributed to either passive fatigue (Desmond & Hancock, 2001) or a decrease in attention resources (Young & Stanton, 2007) when drivers did not have a secondary task to perform. As previously suggested, complacency, characterized in this study by a high level of trust, can lead to difficulty when resuming manual control (Hoc *et al.*, 2009). Thus, complacency could explain the longer reaction times in system failure scenarios for drivers who had high trust in the FAD dimension. This result was also congruent with Bainbridge's work (1983), although the field of investigation was driving automation. Notwithstanding, this study was conducted in a simulator, which may have decreased the participants' feelings of lethal danger while using the FAD, and thus increased their levels of trust and acceptance of the system.

Elaborate practice was found to contribute to better calibrated trust in the FAD system, as the negative impact on reaction time was mitigated. Concerning calibration, it could be argued that an appropriate level of trust in FAD can be built with *meta trust*, which is defined as *the trust a person has that another person's trust in the automation is appropriate* (Lee & See, 2004). It has also been argued that communicating ongoing feedback to users on the automation's reliability can help develop an appropriate level of trust in the system (Hoff & Bashir, 2014). First-time FAD users will probably share their experiences with non-users, making them aware of the overall capabilities of the system. As the participants did not share their knowledge with one another, further research should investigate the impact of feedback and meta trust on MCR performance. No significant differences were found between *a priori* and *a posteriori* FAD acceptability. However, concerning the dimension of *interest in impaired driving*, the mean score was significantly lower *a posteriori*, which could mean that participants were less confident in using such a system while impaired after experiencing a system failure.

Both practice runs by the participants were very short. However, the purpose of the study was to compare practice runs in terms of quality instead of quantity. Indeed, this kind of short practice session could be used by car dealers to show drivers how to recover control as this format was a typical first interaction situation. While FAD policy remains in a legal

limbo, showing people how to practice FAD basic maneuvers (i.e., engaging the system and recovering control) could significantly improve safety when drivers use such systems for the first time. Examining the impact of a longer practice session on the MCR performance should be examined as it could highlight other dimensions of MCR performance.

Generalizing this study's results should be done with caution. It is possible that some participants did not immediately understand that the *system failure* alarm referred to the driving system, not the simulator, so giving drivers more specific instructions (i.e., *recover control* instead of *system failure*) might help them recover control more safely (Inagaki, 1999). Since FAD knowledge might impact attitude and behavior while using such a system, further research should examine the effects of training (i.e., more developed practice) on FAD performance by telling drivers how FAD works, and what are its potentials and limits. FAD prototypes are driven by experts who know exactly how the technology they are dealing with works, whereas regular drivers do not have this specific knowledge. This could lead to a poor representation of the system, resulting in low performances. In the future, interaction with the system in the practice session should be emphasized to highlight the positive impact of practice on MCR performance. Moreover, although high values were reported in the results (i.e., reaction times around 8 s in the emergency situation), they were not considered outliers and were representative of inter-individual variability. Indeed they come from the population of interest and no measurement errors were found. Eventually, the results of our study need further corroboration.

Finally, the effects of performing a task before resuming control should be examined in both anticipated and emergency situations, since the mental workload and having the hands occupied might have an impact on MCR.

6. Conclusion

The purpose of this paper was to emphasize the effect of trust and practice on MCR performance when using FAD. The results showed that unexpected events could lead drivers to have slower reaction times when they have a high level of trust in the system. These findings might help policy-makers and designers in different ways. On the one hand, a specific automated driving license could be a solution to train users to recover manual control in the most critical situations. On the other hand, designers should take into consideration that experience with the system improves MCR reaction-time performance; hence, incorporating a tutorial with specific feedback on how to cope with critical situations could improve the quality of the human-machine interaction.

Key points

- Drivers should be taught how to use fully automated driving (FAD).
- In simple practice conditions, a high level of trust can have a negative impact on emergency manual control recovery (MCR) reaction time.
- Elaborate practice mitigates the negative impact of overtrust on emergency MCR reaction times.

References:

- af Wählberg, A. E. (2007). Long-term effects of training in economical driving: Fuel consumption, accidents, driver acceleration behavior and technical feedback. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37(4), 333-343.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.
- Barley, S. (1990). The Final Call: Air Disasters... When will they ever learn? Sinclair-Stevenson, London.
- Brookhuis, K.A. & de Waard, D. (2006). Consequences of automation for driver behavior and acceptance. *IeA 2006 congress (CD-ROM)*. Amsterdam: Elsevier.
- Cohen, M. S., Parasuraman, R., & Freeman, J. T. (1998). Trust in decision aids: A model and its training implications. In *Proc. Command and Control Research and Technology Symp.*
- Desmond, P. A., Hancock, P. A., & Monette, J. L. (1998). Fatigue and automation-induced impairments in simulated driving performance. *Transportation Research Record*, 1628, 8-14.
- de Waard, D., van der Hulst, M., Hoedemaeker, M., & Brookhuis, K. A. (1999). Driver behavior in an emergency situation in the Automated Highway System. *Transportation Human Factors*, 1, 67-82.
- Dzindolet, M.T., Peterson, S.A., Pomranky, R.A., Pierce, L.G., & Beck, H.P. (2003). The role of trust in automation reliance. *International Journal of Human-Computer Studies*, 58, 697-718.
- Federal Aviation Administration (2013). Operational Use of Flight Path Management Systems. Retrieved from http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/afs/afs400/parc/parc_reco/media/2013/130908_PARC_FltDAWG_Final_Report_Recommendations.pdf
- Hoc, J. M., Mars, F., & Milleville-Pennel, I. (2006). Human-machine cooperation in car driving for lateral safety: delegation and mutual control. *Le travail humain*, 69(2), 153-182.

- Hoc, J.M., Young, M. S., & Blosseville, J.M. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 10, 135-60.
- Hoff, K. A., & Bashir, M. (2014). Trust in Automation Integrating Empirical Evidence on Factors That Influence Trust. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. doi:10.1177/0018720814547570
- Inagaki, T. (1999). Situation-adaptive autonomy: Trading control of authority in human-machine systems. *Automation technology and human performance: Current research and trends*, 154-159.
- Inagaki, T. (2006). Design of human-machine interactions in light of domain-dependence of human-centered automation. *Cognition, Technology & Work*, 8(3), 161-167.
- Inagaki, T., & Furukawa, H. (2004, October). Computer simulation for the design of authority in the adaptive cruise control systems under possibility of driver's over-trust in automation. In *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on* (Vol. 4, pp. 3932-3937). IEEE.
- Jarvenpaa, S. L., Tractinsky, N., & Saarinen, L. (1999). Consumer Trust in an Internet Store: A Cross- Cultural Validation. *Journal of Computer- Mediated Communication*, 5(2), 0-0.
- Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out- of- the- loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, 16(3), 126- 131.
- Kopf, M., Nirschl, G. (1997). Driver-vehicle interaction while driving with ACC in borderline situations. *Proceedings of the 4th world congress on intelligent transport systems*. Berlin, Germany.
- Kopf, M., Simon, J. (2001). A Concept for a learn-adaptive advanced driver assistance system. *Proceedings of the conference on cognitive science approaches*. Neubiberg, Germany.
- Lee, J. D., & Moray, N. (1992). Trust, control strategies and allocation of function in human-machine

systems. *Ergonomics*, 35, 1243 -1270.

Lee, J. D., & Moray, N. (1994). Trust, self-confidence, and operator's adaptation to automation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 40, 153-184.

Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 46(1), 50-80.

Manstetten, D., Krautter, W., Engeln, A., Zahn, P., Simon, J., Kuhn, F., Frank, P., Junge, M., Lehrach, K. & Buld, S. (2003). Learnability of Driver Assistance Systems – Invent FVM – Driver behavior and Human Machine interaction. In *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent transport systems*, Madrid, Spain.

May, J. F., & Baldwin, C. L. (2009). Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12, 218–224. doi:10.1016/j.trf.2008.11.005

McClellan, J.M. (1994). Can you trust your autopilot? *Flying*, 76-83.

Muir, B. M. (1987). Trust between humans and machines, and the design of decision aides. *International Journal of Man-Machine Studies*, 27, 527–539.

Muir, B. M., & Moray, N. (1996). Trust in Automation: Part II. Experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation. *Ergonomics*, 39(3), 429-460.

Neubauer, C., Matthews, G., & Saxby, D. (2012). The effects of cell phone use and automation on driver performance and subjective state in simulated driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 56, No. 1, pp. 1987-1991). Sage Publications.

National Highway Traffic Safety Administration (2013). *Preliminary Statement of Policy Concerning Automated Vehicles*. Retrieved from http://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/Automated_Vehicles_Policy.pdf

Orr, J. M., Sackett, P. R., & DuBois, C. L. Z. (1991). Outlier detection and treatment in I/O Psychology: A survey of researcher beliefs and an empirical illustration. *Personnel Psychology*, 44, 473-486.

- Parasuraman, R. (2000). Designing automation for human use: Empirical studies and quantitative models. *Ergonomics*, 43(7), 931–951.
- Parasuraman, R., & Manzey, D. (2010). Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration. *Human Factors*, 52, 381–410.
- Parasuraman, R., & Riley, V. A. (1997). Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse, *Human Factors*, 39(2), 230-253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 30(3), 286-297.
- Payre, W., Cestac, J., & Delhomme, P. (2014). Intention to use a fully automated car: Attitudes and *a priori* acceptability. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27(Part B), 252-263. doi: 10.1016/j.trf.2014.04.009
- Riley, V. (1994). A theory of operator reliance on automation. In M. Mouloua & R. Parasuraman (Eds.), *Human performance in automated systems: Recent research and trends*, 8-14.
- Saad, F., Hjälm Dahl, M., Cañas, J., Alonso, M., Garayo, P., Macchi, L., Nathan, F., Ojeda, L., Papakostopoulos, V., Panou, M., Bekiaris, E. (2004). Literature review of behavioural effects. *AIDE, Deliverable 1.2.1*.
- Saxby, D.J., Matthews, G., Hitchcock, E.M., & Warm, J.S. (2008). Development of active and passive fatigue manipulations using a driving simulator. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 51st Annual Meeting*, Baltimore, MD.
- Saxby, D. J., Matthews, G., Warm, J. S., Hitchcock, E. M., & Neubauer, C. (2013). Active and passive fatigue in simulated driving: Discriminating styles of workload regulation and their safety impacts. *Journal of experimental psychology: applied*, 19(4), 287.
- Stanton, N.A. & Young, M.S. (1998). Vehicle automation and driving performance, *Ergonomics*, 41-7, 1014-1028. doi.org/10.1080/001401398186568
- Stanton, N.A. & Young, M.S. (2005). Driver behaviour with adaptive cruise control. *Ergonomics*, 48(10), 1294-1313. doi:10.1080/00140130500252990

- Stanton, N.A., Young, M.S., Walker, G.H., Turner, H., & Randle, S. (2001). Automating the driver's control tasks. *International Journal Of Cognitive Ergonomics*, 5(3), 221-236. doi:10.1207/S15327566IJCE0503_5
- Tversky, B. (2011). Visualizing thought. *Topics in Cognitive Science*, 3(3), 499-535.
- Weinberger, M., Winner, H., Bubb, H. (2001). Adaptive cruise control field operational test—the learning phase, *JSAE*, 22, 487-494.
- Wickens, C. D., Gempler, K., & Morpew, M. E. (2000). Workload and reliability of predictor displays in aircraft traffic avoidance. *Transportation Human Factors*, 2, 99–126.
- Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). Engineering psychology and human performance. ISBN: 0-321-04711-7.
- Wiener, E. L. (1981). Complacency: Is the term useful for air safety? In *Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar*, 116-125, Denver: Flight Safety Foundation, Inc.
- Young, M. S. & Stanton, N. A. (2007). What's skill got to do with it? Vehicle automation and driver mental workload. *Ergonomics*, 50(8), 1324-1339. doi:10.1080/00140130701318855
- Yuki, M., Maddux, W. W., Brewer, M. B., & Takemura, K. (2005). Cross-cultural differences in relationship-and group-based trust. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 31(1), 48-62.